



## Análise Numérica 3D do Radier Estaqueado da Petra Tower, o edifício mais alto do Paraguai

André Querelli

Eng. M.Sc., Diretor, **Solotechnique**, Jundiaí, São Paulo, andre.querelli@solotechnique.com.br

Tiago de Jesus Souza

Eng. D.Sc., Diretor, **Solotechnique**, Jundiaí, São Paulo, tiago.souza@solotechnique.com.br

**RESUMO:** A análise e projeto de fundações em radier estaqueado têm recebido atenção especial por parte da comunidade técnica de fundações, devido às suas aplicações e relevância prática em obras de grande porte. Embora o uso dessa tipologia seja mais usual em edifícios altos, o contexto geológico da área de construção associado às preocupações quanto à deformabilidade podem indicar o radier estaqueado como melhor opção a se adotar. Este artigo tem como objetivo apresentar um caso na cidade de Assunção, Paraguai. O projeto em questão é a chamada “Petra Tower”, edificação residencial com altura total de mais de 175 metros. Essa é uma imponente obra de engenharia e arquitetura da capital paraguaia, projetada com design de última geração e tecnologias de ponta. O “arranha-céu” será o edifício mais alto do país. Durante a concepção estrutural, os autores do presente artigo dedicaram esforços na Modelagem Numérica Tridimensional da fundação, de modo a resultar na solução mais otimizada possível, em sintonia com o que o empreendimento demanda. O artigo mostra o modelamento efetivo do radier estaqueado como solução de fundação em elementos finitos (MEF), apresentando gráficos comparativos, tabelas e *outputs* gerados pelo software de análise. Também serão abordadas considerações sobre os cuidados necessários para a execução dessa solução, levando em conta as práticas adotadas no contexto geotécnico do Paraguai e a compatibilidade com a geologia local.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundações, radier estaqueado, estaca raiz, rocha, arranha-céu, modelagem numérica, MEF, Paraguai, Petra Tower.

**ABSTRACT:** The analysis and design of piled raft foundations have received special attention from the technical foundation community due to applications and practical relevance in large-scale construction projects. Although its use is usual in tall buildings, the geological context of the construction area and concerns regarding deformability may indicate piled raft foundations as the preferred option to adopt. This article presents a case study in the city of Asunción, Paraguay. The presented project is the "Petra Tower," a building with a total height of over 175 meters with impressive engineering and architectural features in the Paraguayan capital, as it will be the tallest building in the country. During the structural design phase, the authors of this paper dedicated efforts to the foundation 3D Numerical Modeling to achieve the most optimized solution. The article shows the effective modeling of the piled raft foundation through Finite Element Method (FEM), presenting comparative graphs, tables, and outputs generated by the analysis software. Considerations regarding the execution of this solution will also be addressed, taking into account the geotechnical practices adopted in the context of Paraguay and its local geology.

**KEYWORDS:** Foundations, piled raft, root pile, rock, skyscraper, numerical modeling, FEM, Paraguay, Petra Tower.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





## 1 Introdução

Nos últimos anos, devido à crescente acessibilidade e eficácia dos programas computacionais, as Simulações Numéricas através da metodologia dos Elementos Finitos têm experimentado significativo crescimento e aplicação, tanto no meio acadêmico como no meio prático. Essa tendência tem se destacado em relação à modelos simplificados de dimensionamento, como os cálculos e verificações analíticas previamente predominantes.

No âmbito analítico, por exemplo, os métodos para estimativa de recalques de fundações diretas comumente utilizados na prática geotécnica rotineira são semi-empíricos, isso é, utilizam resultados dos ensaios de campo e combinam os fundamentos da teoria da elasticidade (Nova e Montrasio, 1991; Fellenius e Altaee, 1994).

Análises baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido objeto de destaque por diversos autores. Estudos conduzidos por Gaba et al. (2002) e Ravaska (2002) demonstraram que essa abordagem permite alcançar projetos de forma substancialmente mais econômica em comparação com métodos convencionais. Essa constatação enfatiza o potencial do MEF como uma ferramenta eficiente para otimização de custos na concepção e dimensionamento de estruturas e sistemas geotécnicos e, no âmbito mais específico da engenharia de fundações, as simulações visam avaliar primordialmente a interação solo-estrutura, obtendo-se *outputs* como recalques totais, interação entre elementos de fundação, máximas tensões induzidas ao maciço (solo/rocha), cargas atuantes no topo das estacas, tensões internas dos elementos estruturais, entre outros dados de saída. Ressalta-se que o modelo constitutivo a ser adotado precisa ser avaliado conforme indicado por Whittle (2006) e por Souza e Querelli (2022) em um caso de obra.

## 2 Aplicabilidade de Radier Estaqueado à Arranha-Céus

Nos últimos anos, o emprego de fundações em radier estaqueado tem sido predominantemente focado na Europa, Ásia e Estados Unidos. A título de exemplo, o Conselho de Edifícios Altos e Habitat Urbano (CTBUH) mapeou os 100 prédios mais altos do mundo, revelando que apenas 17 deles ostentam mais de duas décadas de existência. Os outros 83 edifícios tem 20 anos ou menos desde o término de suas construções. Reul e Randolph (2003) detalharam dois casos de edifícios na cidade de Frankfurt – um deles (*Westend 1*) possui 208m de altura e o outro, o *Messeeturm*, que figurou entre o mais alto da Europa (1988-1991) com 256m. Ambas as edificações foram projetadas com fundações em radier estaqueado.

## 3 Contextualização do Estudo de Caso – Aspectos gerais e Subsolo da Petra Tower

A Petra Tower foi projetada para ser o edifício mais alto do Paraguai, com 51 pavimentos e 175 m de altura e 200 unidades de apartamento. O terreno de implantação está localizado em uma importante avenida da cidade, a Av. Dr. Felipe Molas López e possui 1200 m<sup>2</sup> de área total.

Essa torre é não somente a mais alta do país, mas também uma obra única, com design de última geração e implementações de alta tecnologia. Na Figura 1 pode-se visualizar a Maquete 3D implantada de como a Petra Tower ficará após finalização de sua construção:

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





Figura 1. Vista geral: Maquete arquitetônica 3D do Edifício Petra Tower

O subsolo da obra guarda relação à gênese das conhecidas *arenas cimentadas de Assunção* (areias cimentadas de Assunção), geradas mediante intrusões magmáticas do Terciário, as quais influenciaram o processo de cimentação e solidarização das areias e arenitos. Elas são solos endurecidos e muito densos, localizados na faixa intermediária entre uma areia extremamente compacta e arenitos, com resistência à compressão não confinada que costuma variar entre 0,5 e 5,0 MPa (5 - 50 kgf/cm<sup>2</sup>). No entanto, apesar de seu aspecto rochoso e elevada resistência à escavação, é prudente serem considerados do ponto de vista geotécnico como “solos”, pois tratam-se de sedimentos arenosos submetidos no passado a diagênese moderada, que nunca se tornaram rocha consolidada efetivamente.

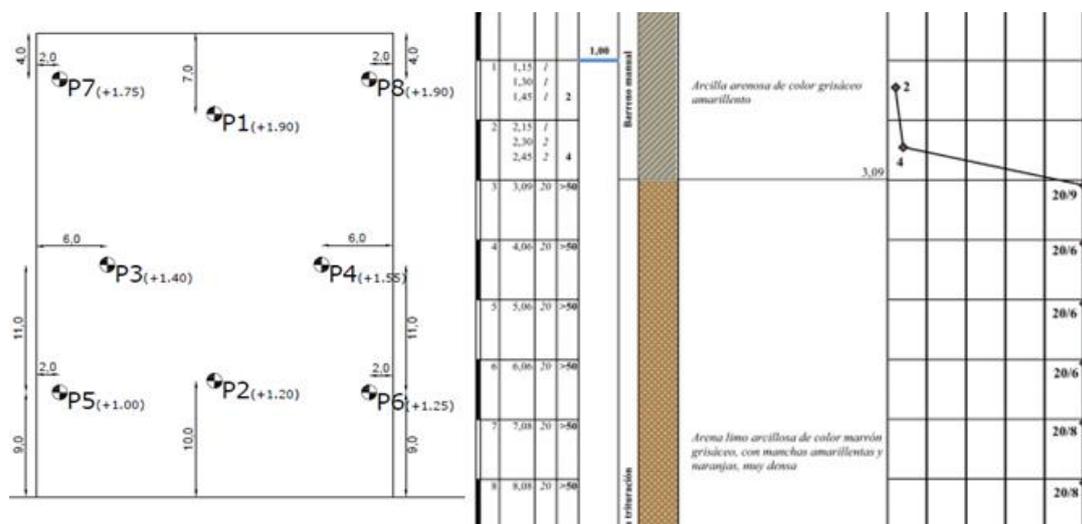


Figura 2. Localização das sondagens no terreno e perfil típico do subsolo

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



À luz das sondagens à percussão realizadas, o subsolo onde o edifício está sendo instalado é bastante homogêneo, constituído por camada superficial argilo-arenosa pouco resistente (mole) com cerca de três metros de profundidade, seguida de camadas de matriz arenosa. O avanço nesse segundo material (arenoso) teve de se dar por meio de sondagem rotativa, porém também sendo possível registro do índice de resistência à percussão ( $N_{SPT}$ ) da ordem de 20 golpes para avanço de apenas 4 a 10cm. Assim, entende-se que se trata de material em zona intermediária entre uma areia extremamente compacta ou um arenito (*arenisca*) muito brando. A Figura 2 contém a locação das sondagens realizadas, juntamente com um dos perfis típicos delas.

#### 4 Composição da Modelagem Numérica 3D em Elementos Finitos (MEF)

##### 4.1 Ferramenta de Análise

Foi realizada Análise Numérica Tridimensional por meio do software Midas GTS NX (*MIDASoft*). Por meio deste, pôde ser determinado o comportamento tensão x deformação do terreno e de todos os elementos de estruturais pertencentes ao projeto em análise. A escolha do Midas GTS NX se justifica pela capacidade de permitir a análise evolutiva do modelo, simulado em fases incrementais de execução (detalhado mais adiante) – aplicando-se variações de tensões, carregamentos e outras condições. Dessa forma é possível obter todo o comportamento da interação solo-estrutura na região das fundações, recalques totais, interação entre os elementos de fundação, tensões máximas induzidas ao solo e na base dos radiers, cargas atuantes no topo das estacas, tensões internas dos elementos estruturais, entre outras informações relevantes.

##### 4.2 Perfil de Subsolo Adotado, Deformabilidade e Critérios de Ruptura dos Materiais

A partir das sondagens, interpretou-se uma fina camada de argila arenosa (mole), seguida pelo arenito (*arenisca*). Como fora planejada execução de estacas dentro deste material rochoso, consideramos que a estrutura do mesmo pudesse ser potencialmente danificada localmente na porção superior (topo da *arenisca*). Assim, considerando o radier da superfície, considerou-se prudente admitir uma espessura nessa região com parâmetros de resistência e deformabilidade inferiores aos metros subsequentes (estrutura potencialmente menos danificadas).

Quanto à discretização de perfil, dada a homogeneidade das sondagens, foram definidas camadas horizontais por toda a área do terreno, conforme mostrado na Figura 3.

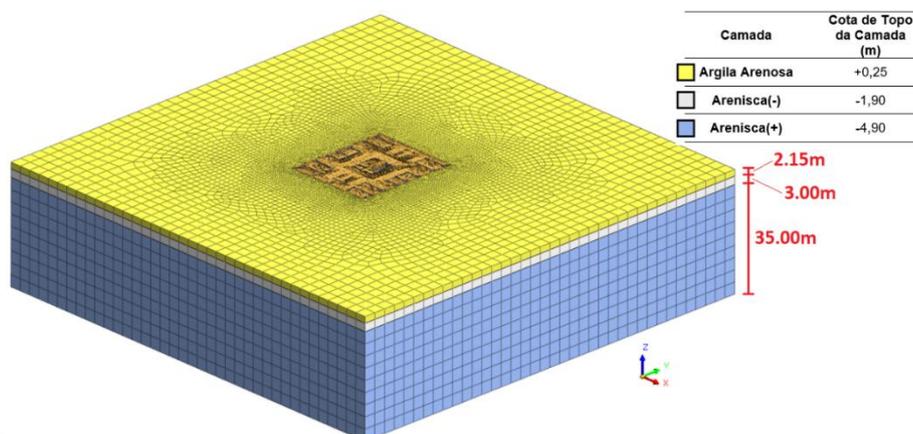


Figura 3. Perfil de subsolo adotado para o modelo

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Aos materiais constituintes do terreno foi atribuído o modelo constitutivo linear-elástico, perfeitamente plástico com critério de plastificação (ruptura) segundo *Mohr-Coulomb*. Este modelo se comporta com aumento das tensões linearmente com as deformações até um limite de resistência preestabelecido (plastificação) e, de acordo com Brinkgreve et al. (2008), é geralmente utilizada como primeira aproximação do comportamento de um solo. Para o módulo de deformabilidade do solo foi considerado por meio de avaliações conjuntas entre a formulação proposta por Teixeira (1993), bem como ensaios triaxiais e de compressão simples em corpos de prova provenientes de amostras indeformadas.

Os parâmetros geotécnicos empregados estão resumidos na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1. Parâmetros de resistência e deformabilidade adotados.

Camada / Material	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (o)	Módulo de Deformabilidade (kPa)	Coef. de Poisson; $\nu$
Argila Arenosa	16	25	23	10000	0,40
Arenisca(-)	19	55	38	100000	0,30
Arenisca(+)	21	90	40	200000	0,25
Solo de Reaterro das Cavas	18	20	32	25000	0,35

No caso dos elementos estruturais, como blocos, pilares, baldramas e estacas, os mesmos foram modelados em concreto, de módulo de Young igual à 30 GPa e com comportamento puramente linear-elástico, isto é, sempre trabalhando dentro da elasticidade tensão-deformação, sem previsão de sua ruptura. A adoção da linearidade como uma simplificação para elementos estruturais é usual em modelagens geotécnicas, devido à diferença de rigidez entre os elementos estruturais e solo e o fato de as estruturas tenderem a trabalhar sempre a baixas deformações.

#### 4.3 Dados de Malha, tipos de Elementos Finitos e Condições de Contorno

Toda a Malha de Elementos Finitos do modelo foi elaborada em elementos Tetraédricos de 4 nós e hexaédricos de 8 nós, com 3 graus de liberdade por nó. Ao total, a malha se constitui de 368.935 elementos e 201.037 nós. A discretização é mostrada na Figura 4.

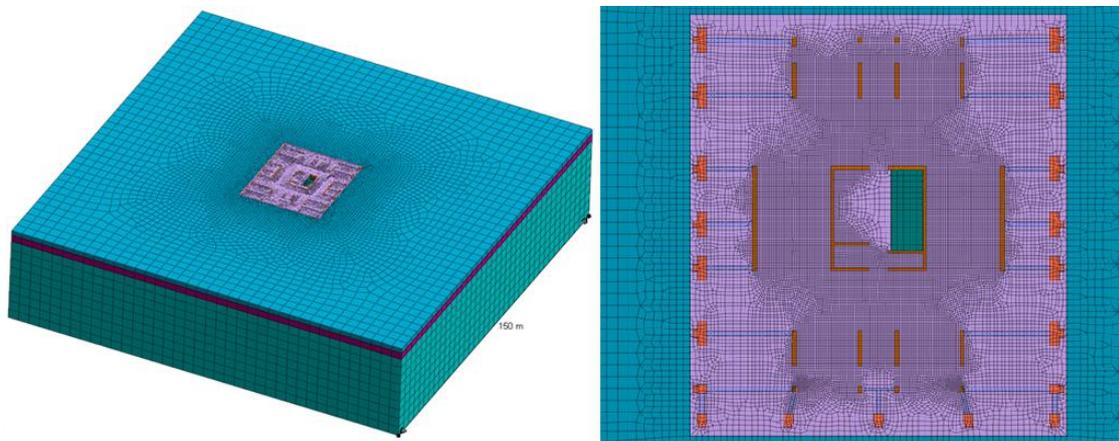


Figura 4. Vista geral da malha de elementos finitos do modelo

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Como condições de contorno, as laterais do modelo foram restringidas na direção perpendicular (ex:  $u_x=0$  e  $u_y \neq 0$ ) e a superfície inferior do modelo restringida em Z ( $u_z=0$ ).

#### 4.4 Elementos de Fundação

As fundações da torre foram concebidas em cinco radiers estaqueados independentes. O embasamento tem fundação em estacas com blocos de coroamento. Os radiers foram apoiados em rocha (*arenisca*; arenito) e todas as estacas estão integralmente embutidas neste material.

As estacas foram modeladas como elementos lineares de viga embebida sem aplicação de interface, garantindo o máximo potencial atrito lateral entre a estaca e o solo. Com isso, os elementos de estaca e solo permanecem ligados e deslocando em simultâneo, comportamento compatível com o perfil do solo/rocha – com previsão de uma maior capacidade de carga suportada pelo atrito lateral. A parcela de carga restante é transferida para a ponta da estaca, dada a grande diferença entre a rigidez do material encontrado no solo e a estrutura (concreto). Os radiers foram modelados como elementos sólidos 3D, com malha de elementos finitos e seu comportamento tensão-deformação tridimensional – em todas as direções.

#### 4.5 Fases Executivas

Foram concebidas seis fases de execução para as fundações da Petra Tower, de modo a permitir uma simulação mais realista da evolução dos deslocamentos. Isso foi feito porque em situações reais de construção, as fases sequenciais permitem um desenvolvimento gradual de tensões e deformações, alívios no solo, recarregamentos e outros fatores – tornado a análise sequencial mais realista.

Na Figura 5 é possível ver as fases de execução consideradas no modelo:

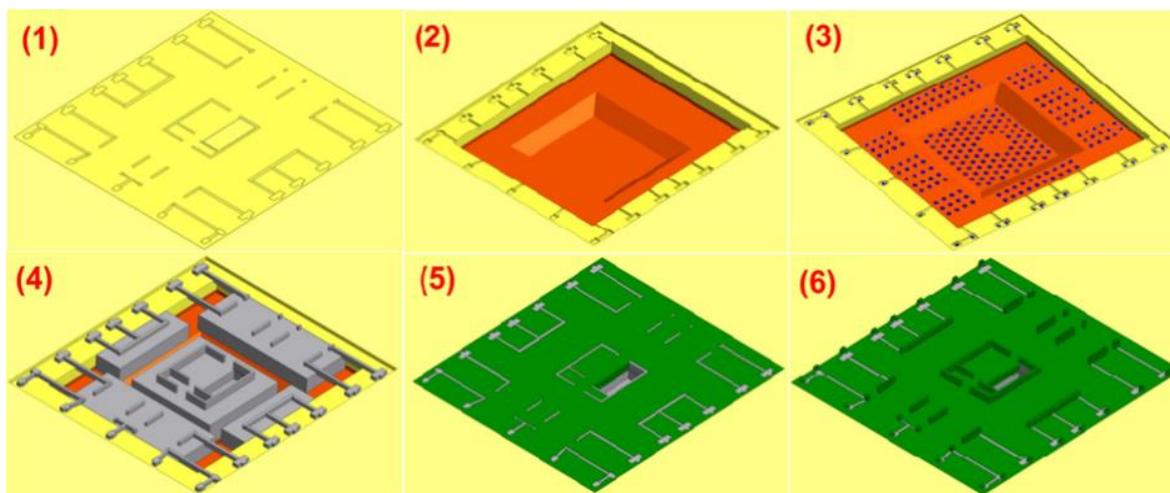


Figura 5. Fases executivas do modelo, sendo (1) a situação inicial do terreno; (2) escavação até nível das estacas e radiers; (3) execução das estacas; (4) execução dos radiers, blocos e vigas; (5) reaterro das cavas; e (6) execução dos pilares e aplicação das cargas provenientes da estrutura.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





## 5 Resultados

Nesta seção, está apresentado resumidamente alguns dos *Outputs* mais importantes e que demonstraram a efetividade da Modelagem 3D das fundações da Petra Tower.

De antemão, é destacado que houve acentuado alívio nas tensões verticais atuantes no maciço oriundas das escavações do terreno, apontando para algo em torno de 20% de redução nas tensões verticais geostáticas após etapa de escavação.

Sobre os Deslocamentos Verticais máximos, a Figura 6 aponta para maior magnitude quanto mais ao centro da edificação, onde se destaca a cor azul mais escura, próximo a 2,1 cm:

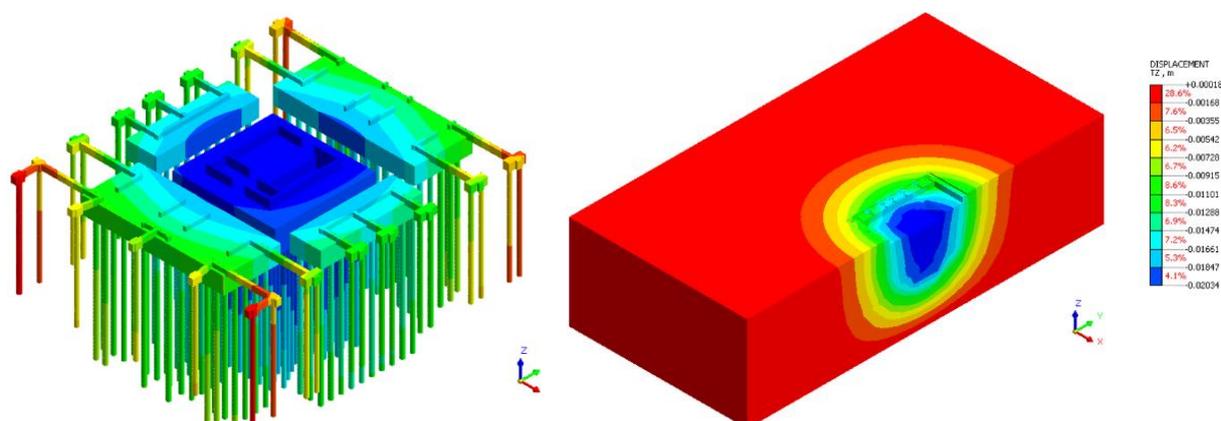


Figura 6. Deslocamentos verticais em radiers, blocos, baldrames e estacas, à esquerda, e tomados diretamente no maciço (solo/rocha), à direita.

Os esforços axiais por estaca constam na Figura 7, onde a imagem da esquerda representa as estacas dos radiers periféricos e à direita, as estacas do radier central. O esforço axial máximo obtido foi de 113 tf nas estacas de radier periférico e 155 tf por estaca do radier central:

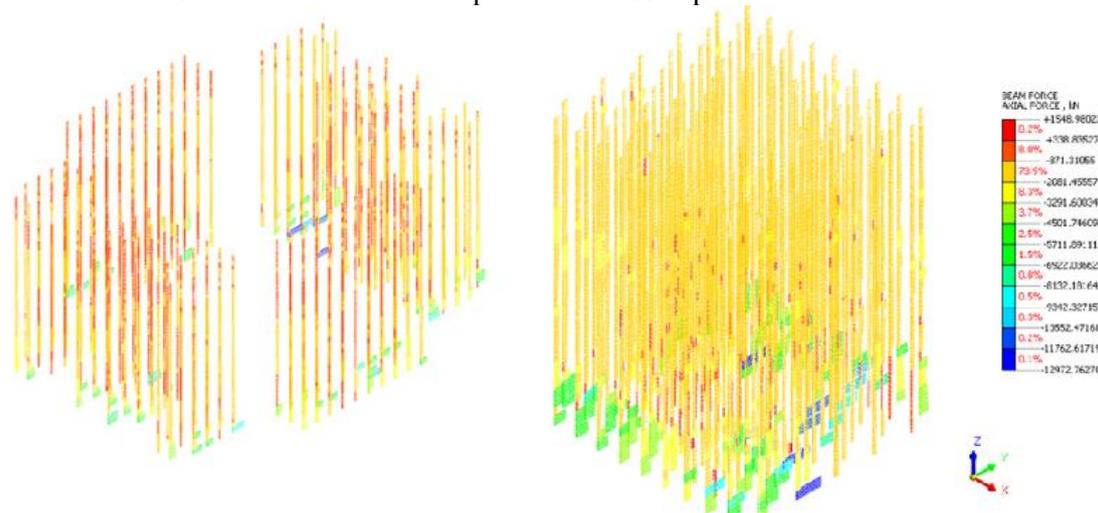


Figura 7. Esforço axial nas estacas dos radiers periféricos (à esquerda) e do radier central (à direita)

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



Também convém avaliar o acréscimo de tensão vertical (plano ZZ) na base do radier (e contato com a *arenisca*), o qual consta mostrado na Figura 8. As tensões verticais máximas obtidas na base dos radiers foram da ordem de 1,6 MPa (16 kgf/cm<sup>2</sup>) no estágio mais crítico de carregamento permanente e vento – valor plenamente aceitável para o material em questão.

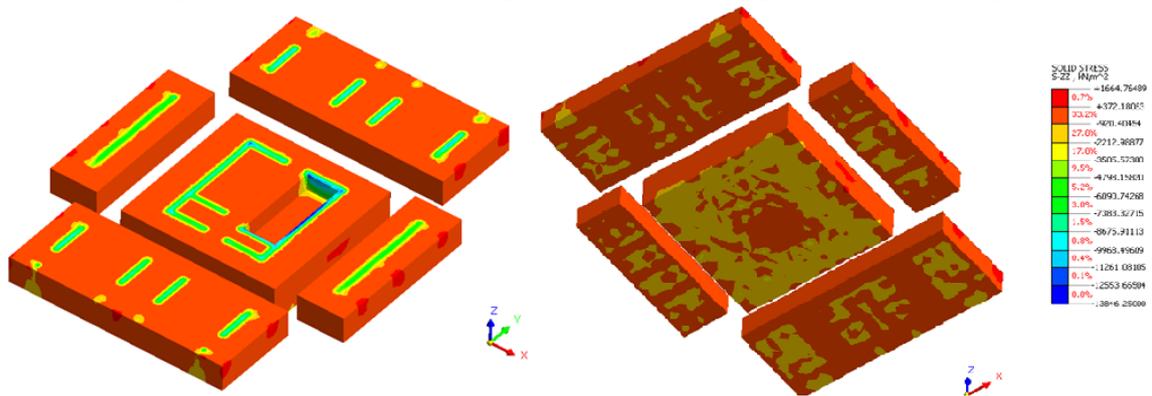


Figura 8. Acréscimo de Tensões Verticais (ZZ) na base dos Cinco Radiers

Para o nível de deslocamentos de serviço (ELS), os resultados mostraram descarga dos esforços no solo de aproximadamente 13% pelo radier e 87% pelas estacas. Essa ordem de grandeza já era esperada, uma vez que as estacas contém comprimentos majoritariamente embutidos na *arenisca*, de modo que por efeito de rigidez relativa e mobilização das resistências a deslocamentos baixos, a carga predominantemente descarrega sobre as fundações profundas.

## 6 Fase Atual da Construção

A equipe de projeto realizou inspeção recente à obra do edifício em questão. Durante essa visita, foram feitas observações e análises detalhadas, culminando em uma avaliação positiva em relação à qualidade técnica e execução do projeto proposto. Atualmente, a obra encontra-se em andamento. As fotos da Figura 9 mostram algumas fases de avanço da construção.



Figura 9. Fotos de diferentes fases da Obra, em ordem cronológica.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



## 7 Conclusões

Os resultados obtidos através da análise numérica tridimensional da implantação da obra demonstram a efetividade do sistema e tipologia em radier estaqueado definido para o corpo da torre do empreendimento Petra Tower.

Os deslocamentos verticais máximos obtidos na região central da torre ficaram por volta de 2,0cm, enquanto no embasamento esse valor gira em torno de 0,8 a 1,2cm. Em termos de esforços axiais máximos de compressão nas estacas, obteve-se 113 tf nas fundações dos raders periféricos e 155 tf por estaca do radier central, com tensões verticais ZZ máximas na base dos raders, aplicadas sobre o arenito, da ordem de 1,6 MPa (16 kgf/cm<sup>2</sup>) no estágio mais crítico de carregamento. Esses valores condizem com o dimensionamento e a faixa de resistência admissível dos componentes da fundação (estacas, radier e solo/rocha).

Não houve indício de instabilidade que poderia ser representada pela não convergência do cálculo ou por deslocamentos excessivos e plastificações localizadas no modelo. Portanto, juntamente a isso, entendemos que os deslocamentos e tensões encontram-se dentro dos limites aceitáveis para a condição de carregamento adotada e o modelo permitiu efetivo sucesso no projeto de fundações do empreendimento.

É importante ressaltar que todas as estimativas de recalques superficiais, bem como tensões e forças resultantes são sujeitas a imprecisões, como ocorre em qualquer modelamento e adoção de premissas. Assim, modelos são ferramentas empregadas para a tomada de decisão de engenharia, sendo preparados para serem o mais aderente possível à realidade, mas não necessariamente a atenderão com perfeição.

Diante desse cenário, é recomendado enfaticamente (e no presente caso não foi diferente) a implantação de um plano de instrumentação de obra, com monitoramento de recalques em diversos pilares durante (e após) a construção. Essa prática permite análises mais precisas das respostas do conjunto solo-estrutura aos carregamentos e podem contribuir para ajustes e tomadas de decisões embasadas em informações concretas. Com a instrumentação adequada, é possível aprimorar o controle e a segurança da obra, mitigando riscos potenciais e garantindo a integridade da estrutura ao longo de sua vida útil.

Atualmente, os dados de monitoramento estão sendo analisados e documentados, e serão posteriormente publicados em estudo comparativo, proporcionando perspectivas relevantes para a comunidade técnica e contribuindo para o avanço da engenharia de fundações em futuros projetos semelhantes.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



## AGRADECIMENTOS

A **Solotechnique** expressa gratidão ao grupo Petra Urbana pela confiança e oportunidade em atuar no projeto de fundações do empreendimento e à projetista estrutural BM integrado pelo trabalho conjunto e multidisciplinar realizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- BRINKGREVE, R.B.J., BROERE, W., WATERMAN, D. (2008), *Plaxis 2D version 9.0, Material Models Manual*. Plaxis BV, Delft.
- FELLENUS, B. H.; ALTAEE, A. (1994). *Stress and settlements of footings in sand*. Proceedings of the ASCE, Conference on Vertical and Horizontal Deformations for Foundations and Embankments, GSP, No. 40, College Station, TX, June 16-18, Vol. 2, p. 1760-1773.
- GABA, A. R., SIMPSON, B., POWRIE, W. & BEADMAN, D. R.. (2002). *Embedded retaining walls: guidance for economic design*. RP 629. London: Construction Industry Information and Research Association.
- NOVA, R.; MONTRASIO, L. (1991). *Settlements of shallow foundations on sand*. *Geotécnica* 41, No. 2, p. 243-256.
- RAVASKA, O. (2002), *A sheet pile wall design according to Eurocode 7 and Plaxis*. In: Numerical methods in geotechnical engineering (ed. P. Mestat), pp. 649–654. Paris: Presses de l'ENPC/LCPC.
- REUL, O.; RANDOLPH, M. (2003). *Piled Rafts in Overconsolidated Clay: Comparison of In situ Measurements and Numerical Analyses*. *Geotechnique*, Vol. 53, No. 3 , 301-315.
- SOUZA, T., QUERELLI, A. (2022). *Análise tensão-deformação para avaliação do impacto de uma contenção atirantada em túneis existentes*. In: VIII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Porto de Galinhas, Brasil.
- TEIXEIRA, A. H. (1993). *Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão*. In: Anais da Mesa Redonda: Solos do Interior de São Paulo, 1993.
- WHITTLE, A.J., DAVIES, R.V. (2006). *Nicoll Highway collapse: evaluation of geotechnical factors affecting design of excavation support system*. In: International Conference on Deep Excavations, Singapore, Proceedings, 91–97.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

