



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Utilização de Radier Estaqueado em Obras Especiais e Edifícios Altos

Msc. Eng. Fábio Albino de Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNICAMP / FEC / Departamento de Estruturas / [fabio@fec.unicamp.br](mailto:fabio@fec.unicamp.br)

### Resumo

A análise e projeto de fundações em radier estaqueado podem ser considerados problemas complexos, pois envolvem inúmeros parâmetros que podem influenciar no comportamento do sistema. De uma maneira geral, o emprego desse tipo de fundação é mais comum em edifícios altos, no entanto a geologia do local (condições do solo) em que a construção será implantada também pode apontar para o uso do radier estaqueado como a fundação mais adequada. Desse modo, o artigo pretende mostrar inúmeras construções em que a escolha do radier estaqueado foi feita com sucesso em edifícios altos e obras especiais. Como principais exemplos na categoria edifícios altos destacam-se o Petronas Tower (Malásia) e o Burj Dubai Tower (Emirados Árabes Unidos) sendo que na categoria obras especiais podemos citar a obra da CCTV (China) e o Monumento à Revolução (México). A fim de complementar o tema de fundações em radier estaqueado será apresentado nesse artigo um estudo de caso para o projeto de um edifício de 33 (trinta e três) pavimentos. Nesse estudo foram considerados parâmetros de projeto para diversas situações bem como a análise estrutural do radier estaqueado.

### Palavras-chave

Radier Estaqueado; Obras Especiais; Edifícios Altos; Burj Dubai ; CCTV ; Petronas Tower.

### Introdução

A escolha do tipo de fundação mais adequada tornou-se um grande desafio nos últimos anos, exigindo do projetista (estrutural e geotécnico) destreza tanto na análise da geologia do local quanto no cálculo estrutural da fundação. A análise dos radiers estaqueados teve uma grande evolução a partir do desenvolvimento das ferramentas computacionais e dos métodos numéricos, que também podem ser correlacionados com o aumento da construção de edifícios altos. POULOS (2009) relatou que nas duas últimas décadas houve um aumento notável na construção de edifícios altos com mais de 150 metros de altura caracterizando esse crescimento como exponencial.

O conceito simplificado de radier estaqueado é um sistema de fundação que absorve as cargas da estrutura através da capacidade de carga da laje sobre o solo (radier) mais a capacidade de carga do grupo de estacas. A fim de visualizar a questão conceitual pode-se relatar o parâmetro conhecido como coeficiente de radier estaqueado ( $\alpha_{PR}$ ) apresentado por MANDOLINI (2003), na qual para um coeficiente ( $\alpha_{PR}=0$ ) toda carga seria absorvida pelo radier isolado, no entanto para um ( $\alpha_{PR}=1$ ) toda a carga seria absorvida pelas estacas. Assim o radier estaqueado teria um ( $\alpha_{PR}$ ) variando de 0 a 1.

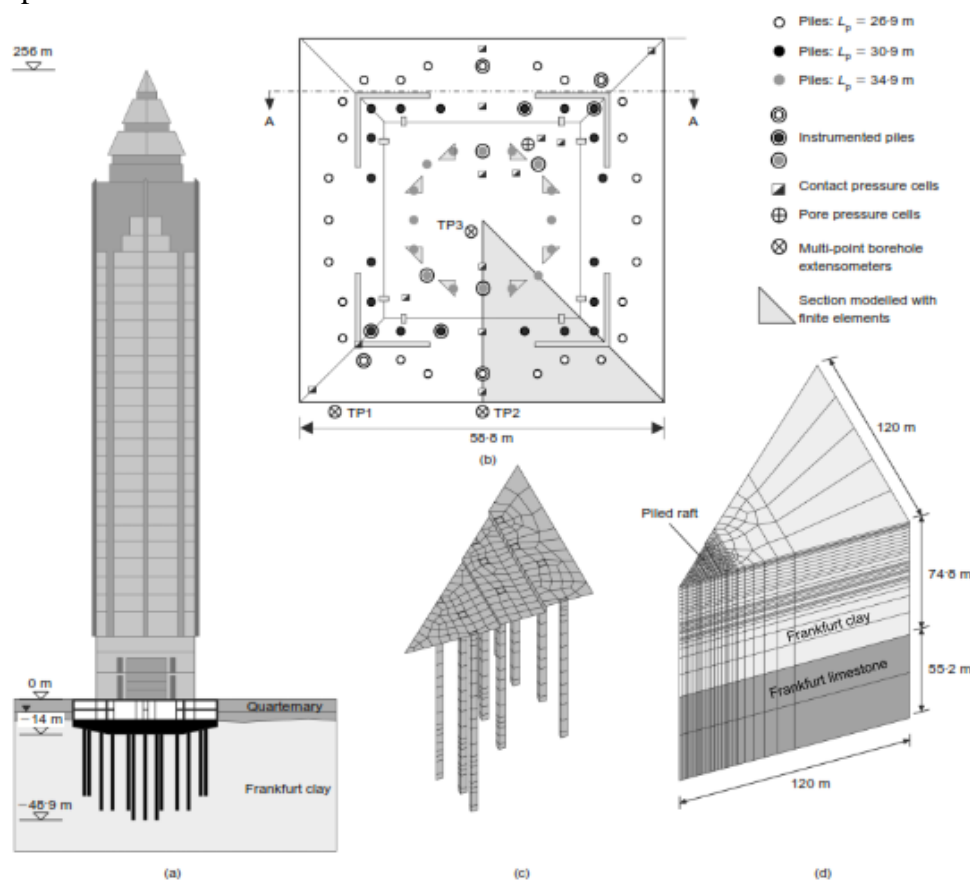
O radier estaqueado tornou-se boa opção técnica e econômica para situações onde somente o radier isolado não consegue satisfazer todos os critérios de projeto e também em situações onde as áreas dos blocos de fundações profundas começam a se sobrepor e ocupar mais de 50% da área de projeção do edifício.



## Aplicação dos radiers estaqueados em edifícios altos

As aplicações dos radiers estaqueados nos últimos anos tem se concentrado na Europa, na Ásia e nos EUA com inúmeros casos de sucesso. REUL e RANDOLPH (2003) detalharam dois casos de edifícios na Alemanha na cidade de Frankfurt. O primeiro edifício chamado de Westend 1 possui em torno de 208 metros de altura com o radier medindo 47 m x 62 m com espessuras variáveis, sendo de 4,50 metros na região central e 3,00 metros nas bordas. Foram utilizadas 40 estacas escavadas com diâmetro de 1,30 metros de 30 metros de comprimento. O coeficiente do radier estaqueado foi de  $\alpha_{PR}=0,5$ , e segundo SALES (2000) a previsão do comportamento foi bem próxima das medições ficando a distribuição de carga em aproximadamente 50% para o grupo de estacas e 50% para o radier.

O segundo edifício, conhecido como Messeturm, já foi considerado um dos mais altos da Europa com 256 metros de altura cuja construção começou em 1988 e foi finalizada em 1991. O radier foi projetado medindo 58,8m x 58,8m, ou seja, um quadrado cuja espessura variou de 6,00 metros na região central e 3,00 metros nas bordas. Foram utilizadas 64 estacas com diâmetro de 1,30 metros com comprimento variando de 34,9 metros nos anéis internos, 30,9 metros no anel central e 26,9 metros no anel externo. O coeficiente do radier estaqueado foi em média de  $\alpha_{PR}=0,6$ , mas esse valor apresentou variação devido ao nível do lençol freático apresentando valores de  $\alpha_{PR}=0,43$ . A figura 1 mostra detalhes do edifício, bem como dos modelos aplicados.



**Figura 1 – Messeturm: (a) Seção transversal; (b) Planta do radier da torre; (c) malha em elementos finitos do radier estaqueado; (d) sistema da malha em elementos finitos.**



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Aplicação dos radiers estaqueados em edifícios super altos (arranha-céu)

O Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) mapeou os 100 edifícios mais altos do mundo e somente 17 deles tem mais do que 20 anos. A figura 2 mostra os 10 edifícios mais altos do mundo.

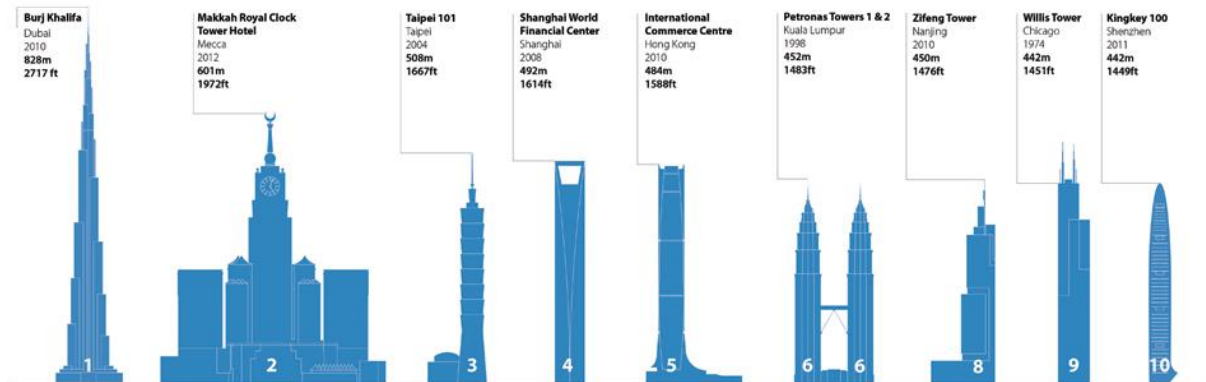


Figura 2 – Os 10 edifícios mais altos do mundo de acordo com o Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (2014).

## Petronas Tower

A construção das Petronas Tower em Kuala Lumpur na Malásia foi um dos grandes desafios para os envolvidos no projeto de fundações principalmente por enfatizar o estudo da formação geológica local, mais conhecida como formação Kenny Hill. A figura 3 mostra detalhes do perfil de fundação da Petronas Tower, bem como a planta do pavimento tipo.

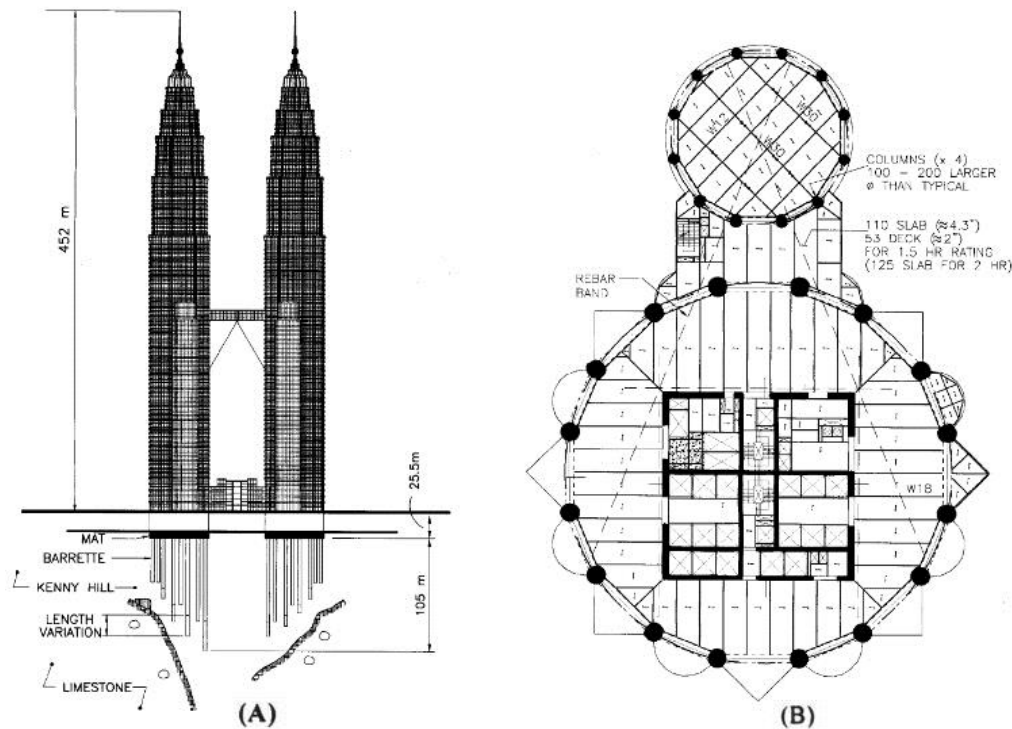


Figura 3 – (a) Perfil de Fundação da Torre e (b) Planta do pavimento tipo





# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

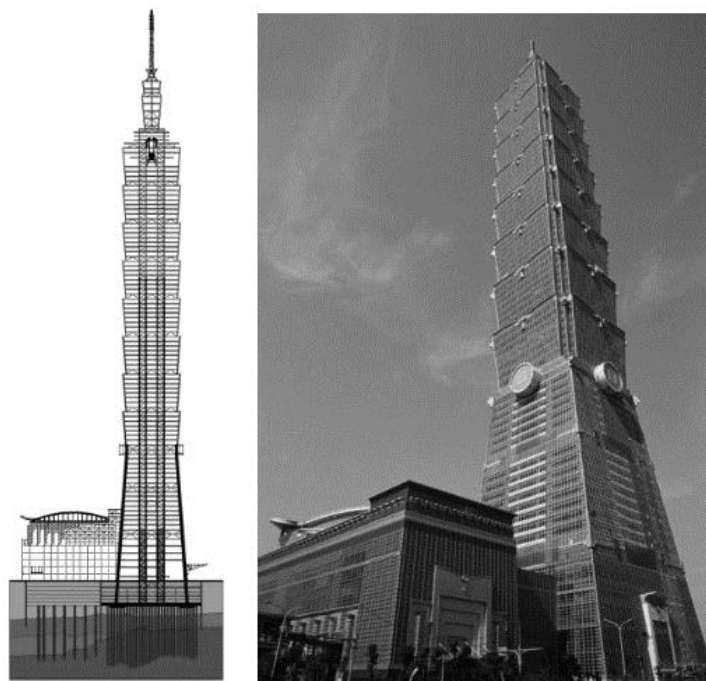


Em 1998 a Petronas Tower foi considerada o maior edifício do mundo com 451,9 metros de altura, 88 pavimentos acima do solo e com 5 subsolos cujo início da construção começou em 1992 e durou 6 anos para ser concluído.

CASTILHO (2013) fez investigações numéricas e relatou que o aumento da quantidade de estacas no sistema de radier estaqueado combinado permitiu a diminuição do recalque, da distorção angular e do aumento dos fatores de segurança global e parcial do sistema. Para o caso das Petronas Tower, BAKER et al.(1998) relatou que a espessura do radier das Petronas Tower foi de 4,50 metros e que houve um estudo para se fazer somente o radier sem estacas no entanto devido as cargas elevadas e o recalque essa tentativa fracassou. Outra preocupação foi com relação aos limites de tensão admissível na formação Kenny Hill na qual foi limitada em  $500 \text{ kN/m}^2$  ( $5\text{kgf/cm}^2$ ). Assim o radier estaqueado foi utilizado com estacas de diâmetro de 1,30 metros com espaçamento entre centros de 4,70 metros e o comprimento das estacas variando de 40 metros a 105 metros, até que o recalque diferencial calculado fosse alcançado.

## Taipei International Financial Center

O projeto do Taipei-101 como é mais conhecido também foi desafiador por estar localizado no Sudeste da Bacia de Taipei no norte de Taiwan. A equipe de engenheiros estruturais e geotécnicos modelaram sua fundação sob condições de carregamento extremas, incluindo terremotos e tufões. A figura 4 mostra o esquema do perfil e foto do Taipei 101.



**Figura 4 – Perfil de Fundação e da Torre do Taipei 101.**

O Taipei 101 atualmente é o terceiro maior edifício do mundo com 508 metros de altura, totalizando 101 pavimentos e 5 subsolos, sendo o início da liberação da construção concebido em 1997 junto ao governo local e aberto ao público em 31 de Dezembro de 2004.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

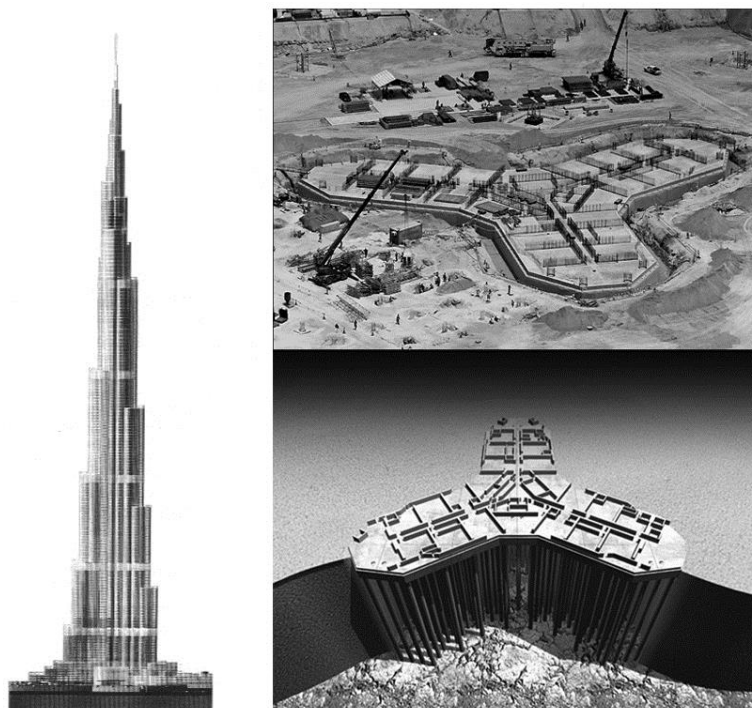
Realização:



Segundo YU (2011) o modelo básico de projeto e análise foi conduzido usando o coeficiente de reação vertical ( $k_v$ ) para o radier isolado e também um coeficiente de reação vertical das estacas estimando as considerações de recalque de cada estaca sob seu carregamento. As dimensões do radier da torre principal são de 87 metros x 98 metros e a espessura do radier variam de 3,00 metros a 4,70 metros, as quais foram projetadas para transmitir as cargas da torre para 380 estacas com diâmetro de 1,5 metros com espaçamento de centro a centro de 3,96 metros. Essas estacas apresentam comprimento de 40 a 60 metros abaixo do nível da fundação e estão embutidas de 15 a 33 na rocha, na qual um recalque adicional foi induzido pelo grupo de estacas e estimado. Também os efeitos de fluência da rocha sob carregamento em longo prazo foram avaliados e levados em conta no recalque em longo prazo da estaca.

## Burj Dubai

O Burj Dubai atualmente ocupa a posição de edifício mais alto do mundo com 828 metros de altura. A geologia do Golfo Pérsico tem sido influenciada pela deposição de sedimentos marinhos resultantes de uma série de mudanças no nível do mar durante um tempo geológico recente e o local considerado dentro de uma área sismicamente ativa. POULOS e BUNCE (2008) e BAKER et al. (2010) mencionam que houve uma extensa investigação geológica dividida em quatro partes principais. A figura 5 mostra os detalhes do projeto da fundação do Burj Dubai.



**Figura 5 – Detalhes do projeto da fundação do Burj Dubai.**

Para a fundação do Burj Dubai foi utilizado o radier estaqueado onde as estacas foram utilizadas para reduzir os recalques, sendo a espessura do radier de 3,70 metros contando com 196 estacas com diâmetro de 1,50 metros e profundidade de aproximadamente 50 metros. O



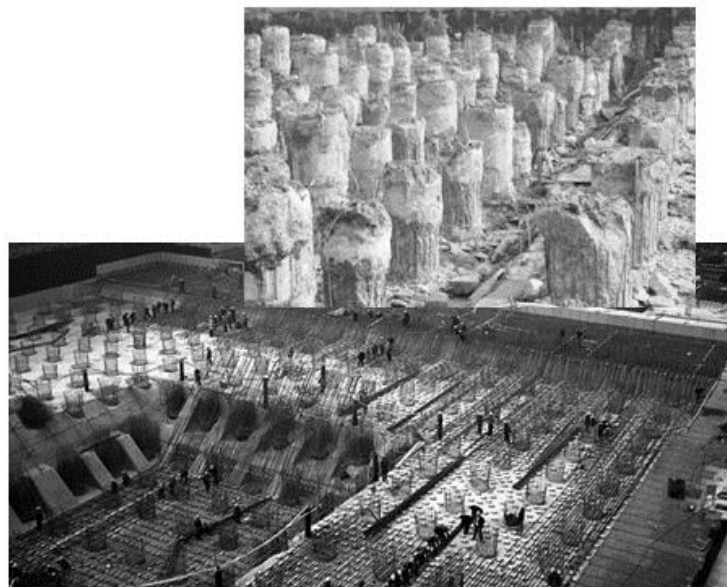
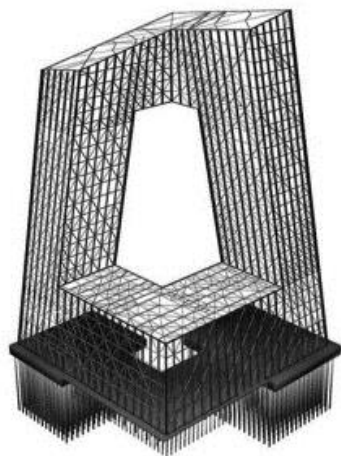
espaçamento mínimo de centro a centro das estacas foi de 2,50 vezes do diâmetro da estaca, e o nível do lençol freático aproximadamente 2,00 metros da superfície, com potencial muito corrosivo. BAKER et al. (2010) relatou que a fundação da torre foi projetada para atender duas condições: o radier isolado absorvendo 40% da carga total e as estacas 60% e a outra condição onde o radier isolado absorvendo 10% da carga total e as estacas 90%.

## Aplicação dos raders estaqueados em obras especiais

Embora o uso do radier estaqueado esteja muito direcionado aos edifícios mais altos do mundo como foi observado neste artigo, não se pode deixar de lado seus benefícios para aplicação em obras especiais, ou seja, edifícios não tão altos, mas que devido a sua complexidade a solução em radier estaqueado tornou-se mais viável.

### China Central Television (CCTV)

A sede da China Central Television (CCTV) embora esteja classificada no ranking global dos edifícios mais altos do mundo em nº358 sendo a quarta construção mais alta de Beijing é sem dúvida uma edificação com uma tipologia e arquitetura notável. Possui 234 metros de altura, 54 pavimentos e 3 subsolos, que teve sua construção iniciada em 2004 e finalizada em 2012, onde foram gastos 1,2 bilhões de dólares. A figura 6 mostra detalhes das estacas e do radier estaqueado.



**Figura 6 – Detalhes do projeto da fundação da CCTV.**

Segundo CARROL et al. (2005) nas torres foi utilizado o sistema em radier estaqueado, onde os raders ficaram separados, sendo que cada radier tinha uma espessura de 7,0 metros contendo 370 estacas de 1,20 metros de diâmetro e 33,0 metros de profundidade. No entanto o total de estacas utilizado foi de 1242 que foram instaladas durante a primavera e o verão de 2005. Outro ponto interessante do projeto foi a análise sísmica que indicou que a fundação





# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

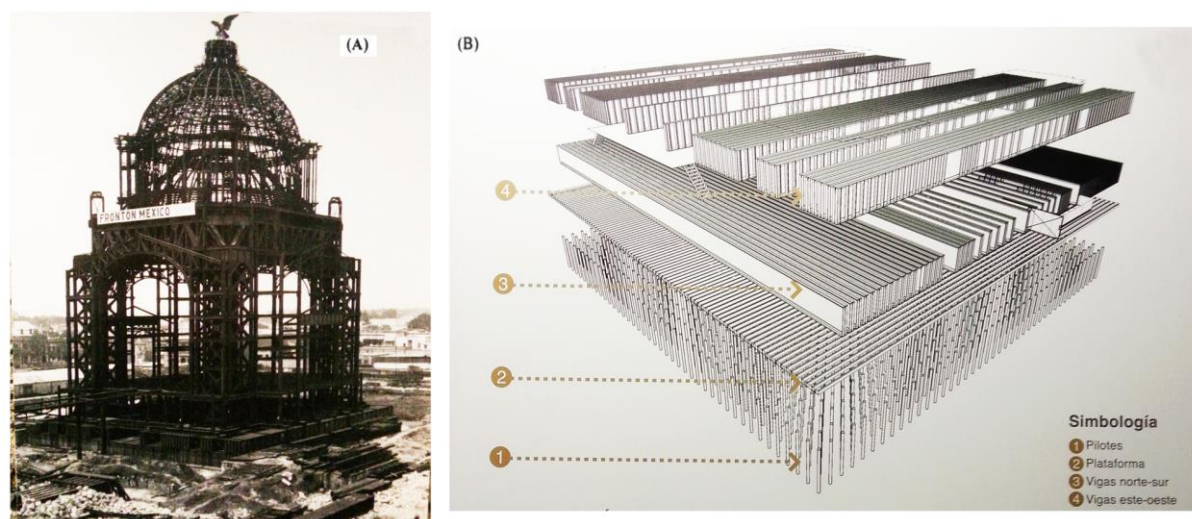
Realização:



poderia suportar terremotos de grandes magnitudes sendo que as estacas foram embutidas na laje do radier estaqueado para melhorar a sua ancoragem.

## Monumento à Revolução – México

A geologia da Cidade do México apresenta desafios para qualquer tipo de fundação sendo considerado um dos piores solos para se construir no mundo. No início do século XVI a Cidade do México era uma cidade-ilha cercada de lagos, no entanto, devido ao crescimento da cidade, houve um plano para que os lagos fossem drenados através de túneis de drenagem. Com essa drenagem, os lagos praticamente desapareceram e novas porções de terra foram surgindo para que a cidade pudesse crescer e expandir. De acordo com FELIX (2013) o perfil geológico típico da Cidade do México seria composto por uma crosta dura de 5,0 m de espessura sendo abaixo dessa crosta uma camada de 23,0 m de argila muito mole seguindo mais 3,0 metros de uma crosta dura e por fim uma camada 15,0 metros de argila mole e depósitos profundos. Foram monitorados entre 1998-2002 os recalques do solo na Cidade do México e os valores apresentaram taxas que variaram de 10 cm/ano até 42 cm/ano (em lugares severos). Em 1897 Porfirio Diaz convocou um concurso para o projeto do Palácio Legislativo Federal, cuja obra começou em 1900, no entanto, com a Revolução Mexicana (1910-1921) o monumento foi nomeado em 1933 como Monumento à Revolução. A construção foi feita pela empresa Milliken Bros utilizando a tecnologia mais avançada da época, onde se aplicou em torno de 17 000 estacas de areia comprimida, de madeira e concreto, e sobre tudo isso foi feito a plataforma de concreto consolidando o radier estaqueado. Sobre a plataforma foram construídas mais 90 vigas de 0,30 m de altura e 45 metros de comprimento em uma direção e 60 vigas de 0,30 m de altura e 43 metros de comprimento. A figura 7 ilustra com clareza o método utilizado.



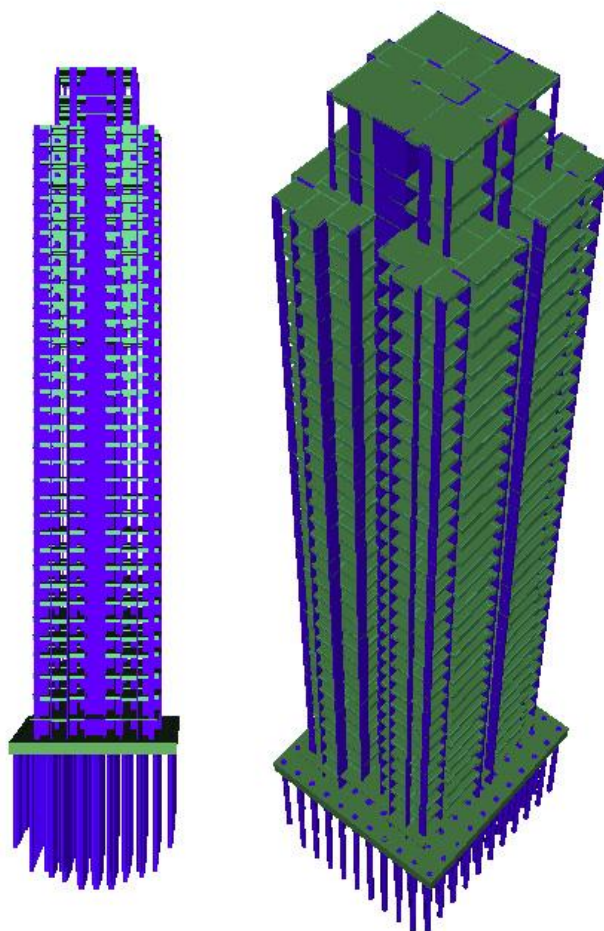
**Figura 7 – (a) Perspectiva da execução do projeto e (b) Detalhes do projeto da fundação do Monumento à República.**



## Estudo de Caso – Tikuna's Tower

O Tikuna's Tower será um edifício residencial na cidade de Manaus – AM com 36 pavimentos, sendo 33 pavimentos tipo e 111,80 m de altura. A área total do empreendimento está em torno de 14100 metros quadrados somente da torre principal com a vantagem de não ter subsolos e sim edifícios garagem anexados à torre principal. O perfil estratigráfico da sondagem de simples reconhecimento à percussão mostra uma geologia com camadas de areia argilosa, areia siltosa e silte arenoso, com o nível de água variando de 5,00 m a 7,00 da superfície da sondagem. A escolha do radier estaqueado nesse caso foi uma solução de viabilidade do projeto tecnicamente, pois a solução anterior em bloco sobre estacas estava se tornando inviável devido à sobreposição de blocos e os blocos ocupando uma área maior que 50% da área de projeção do projeto. A figura 8 mostra mais detalhes do perfil do projeto.

### Características do Projeto:



#### - Estabilidade Global

Coeficiente Gama Z

Gama Z (X) = 1,18

Gama Z (Y) = 1,11

#### - Análise de 2º Ordem P-Delta

Vento (X) = 13,49%

Vento (Y) = 7,95 %

#### - Pilar mais solicitado = 2845 Toneladas

#### - Deslocamentos Horizontais

Deslocamento Limite = 6,78 cm

Deslocamento Freqüente (X) = 3,70 cm

Deslocamento Freqüente (Y) = 2,60 cm

#### - Imperfeições Geométricas Globais

Combinação Vertical : G1+G2+A+Q

Ângulo mínimo = 1/300

Ângulo adotado = 1/418

#### - Radier estaqueado com 121 estacas

Figura 8 – Detalhes do projeto

Foram realizados três estudos para o comportamento do radier estaqueado no tocante a atender três condições:

1-) Nenhuma contribuição do radier isolado no solo ou seja todo carregamento sendo absorvido pelas estacas. Nessa condição as estacas de 80cm tinham 18 metros de





# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

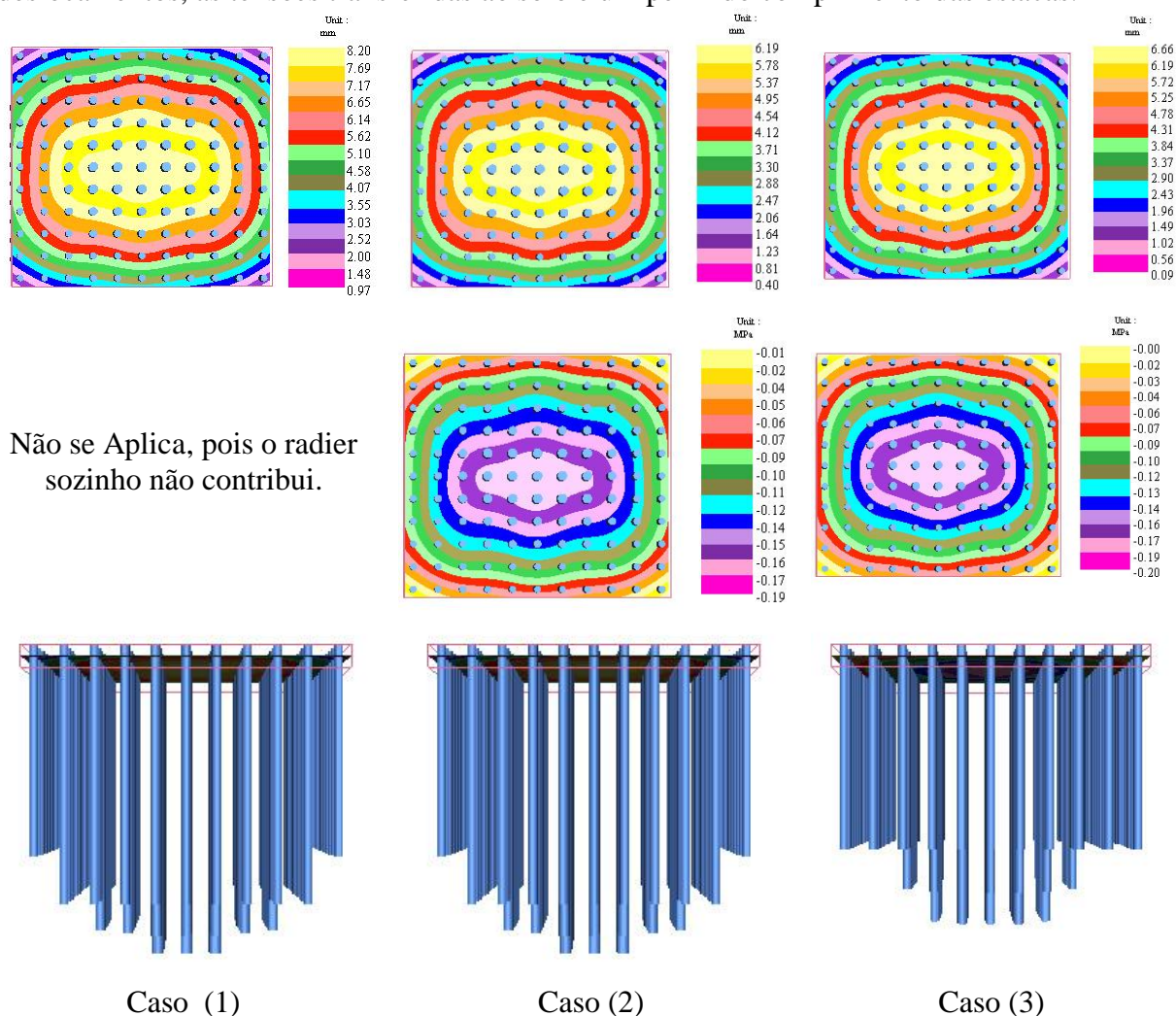


comprimento no anel externo e 22 metros no anel interno, as estacas de 90cm e 100 cm tinham 25 metros de comprimento e as estacas de 110cm tinham 27 metros de comprimento.

2-) O radier isolado descarregando uma tensão máxima no solo de  $2,0 \text{ kgf/cm}^2$  e o restante sendo absorvido pelas estacas. A configuração de diâmetro e de comprimento das estacas seguiram as condições do caso 1.

3-) O radier isolado descarregando uma tensão máxima no solo de  $2,0 \text{ kgf/cm}^2$  e o restante sendo absorvido pelas estacas. Nessa condição as estacas de 80cm tinham 18 metros de comprimento no anel externo e 22 metros no anel interno, as estacas de 90cm e 100 cm tinham 25 metros de comprimento (otimizado).

Para ambos os casos a espessura da laje do radier foi de 2,00 metros e a figura 9 ilustra os deslocamentos, as tensões transferidas ao solo e um perfil do comprimento das estacas.



**Figura 9 – Detalhes dos três casos aplicados**

Assim como preconiza a NBR 6122/2010, os ensaios de prova de carga estática serão realizados. Embora a referida norma recomende 1% do número total de estacas, as provas de carga serão realizadas para todos os diâmetros do projeto mesmo que não atinja 1% do total, a fim de calibrar o modelo teórico com o modelo real.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Conclusões

No tocante as conclusões desse artigo, é pertinente relatar:

- O coeficiente do radier estaqueado ( $\alpha_{PR}$ ) mostra-se um parâmetro importante na avaliação dos raders estaqueados principalmente para edifícios altos e super altos.
- O conceito e utilização do radier estaqueado vêm crescendo nos últimos anos e dos 100 edifícios mais altos do mundo 83% deles tem menos que 20 anos.
- A geologia e as condições ambientais (ex: terremoto, furacões) em que o radier estaqueado estará exposto influenciam de maneira decisiva no dimensionamento estrutural do conjunto.
- Com relação ao estudo de caso foram apresentadas três situações, onde a situação otimizada apresentou uma redução de 15% do volume de concreto das estacas.
- Para a situação otimizada do estudo de caso o radier isolado foi projetado para absorver 30% da carga total e as estacas 70%.
- O dimensionamento do radier estaqueado do estudo de caso levou em conta os recalques tanto por encurtamento elástico do fuste como também os recalques do solo sendo a taxa de armadura em torno de  $62,40 \text{ kg/m}^3$ .

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT – NBR 6122 – Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro, 2010.
- BAKER, C.N J.; DRUMRIGHT, E.; JOSEPH, L. M.; AZAM I. T.;, Foundation Design and Performance of the World's Tallest Building, Petronas Tower, Proceedings: Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, March , 1998.
- BAKER, W.; RANKIN, D.S.; PAWLIKOWSKI, J. J., The Influence of Foundations on the Design and Behavior of Supertall Buildings, The Art of Foundation Engineering Practice, Geotechnical Special Publication n° 198, ASCE- American Society of Civil Engineers, 2010.
- CARROLL, C., CCTV Headquarters, Beijing, China: Structural Engineering Design and Approvals, the Arup Journal, 40, pp-3-9, 2005.
- CASTILHO, D. Y. A., Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios Assentes sobre Solo Colapsível. Dissertação de Mestrado, Publicação n° G.DM-223/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p, 2013.
- FELIX, J., Foundations in Difficult Soft Soils, Conferência em Tecnologia de Fundações –CTF, Campinas, 2013.
- MANDOLINI, A., Design of Piled Raft Foundations: Practice and Development, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp. 59-80, 2003.
- POULOS, H. G., Tall Buildings and Deep Foundations. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.
- POULOS, H. G.; BUNCE, G., Foundation Design for the Burj Dubai – The World's Tallest Building, Proceedings: 6<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August , 2008.
- REUL, O.; RANDOLPH, M. F., Piled Rafts in Overconsolidated Clay: Comparison of in situ Measurements and Numerical Analyses. Géotechnique 53, No. 3, pp. 301-315, 2003.
- SALES, M. M., Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 229p , 2000.
- YU, C-H., On Design and Construction of Pile Group Foundation of Taipei 101. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol 42, n° 2, 2011.