

Estudo Comparativo entre Bulbos de Tensão Teóricos e de Modelos Reduzidos de Sapatas Próximas por Meio de Fotoelasticidade

Fernanda de Moraes Gomes

Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil, fernandamoorais@yahoo.com.br

Kurt André Pereira Amann

Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil, kpereira@fei.edu.br

RESUMO: Os bulbo de tensões (linhas isóbaras) induzidos no solo pelo carregamentos de uma sapata podem ser calculados pela teoria da elasticidade e neste artigo tais bulbos teóricos são comparados com aqueles visualizados pela técnica de fotoelasticidade aplicada a modelos reduzidos de sapatas. Uma das vantagens da análise de tensões por fotoelasticidade é a facilidade de visualizar imediatamente a distribuição das tensões e ainda verificar a importância relativa dos vários modos de aplicação de carga. Objetiva-se ainda neste artigo analisar a interação entre os bulbos de tensões em modelos reduzidos de fundações por sapatas instaladas a diferentes distâncias. O estudo é baseado no trabalho de Schiavon (2010) e Detilli (2013), dimensionando-se os modelos e o tanque construído em acrílico para evitar a influência de efeitos de fronteira das paredes no experimento e na qualidade da imagem das linhas de tensão. Apresenta-se a proposta de um recurso para medir as deformações simultaneamente à visualização das tensões dentro da massa de material fotoelástico. Os resultados obtidos permitiram identificar a formação de um bulbo resultante da associação das tensões das duas sapatas conjuntamente quando instaladas muito próximas. A comparação entre este bulbo conjugado e o bulbo das sapatas isoladas permite estabelecer uma relação entre ambos, podendo ser usada em projetos com elevada densidade de sapatas distribuídas na área da edificação.

PALAVRAS-CHAVE: Fotoelasticidade, tensões, sapatas, fundações, bulbos de tensões.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo propõe aplicar a técnica de fotoelasticidade para visualização e estudo dos bulbos de tensão formados por fundações diretas, particularmente em modelos de sapatas instaladas próximas umas às outras.

Segundo Torres (2008, apud BRODSKY et al., 1970), a análise fotoelástica é uma técnica que transforma tensões existentes no interior dos corpos transparentes em padrões de luz visível. Segundo Torres (2008, p. 49) a técnica consiste em um feixe de luz polarizada atravessar o modelo de material fotoelástico, que apenas transmite as componentes de ondas que incidem paralelamente ao plano de tensões principais, formando assim as franjas que representam diferentes níveis de tensão. A ordem de franja corresponde a um valor numérico designado com

base na sua posição em uma tabela de sequência de cores. A cor exata depende do processo fotográfico utilizado para registro. Além disso, na análise fotoelástica com luz branca, a determinação da ordem de franja fica limitada entre a primeira e a quinta franja, pois, a partir deste ponto, as cores se tornam tênues e de difícil distinção (TORRES, 2008, p. 51). Contudo, com uma análise da sensibilidade humana às cores na luz, verificasse que a luz monocromática verde é a mais precisa para uma análise quantitativa das tensões.

No presente estudo o material fotoelástico usado para modelar o solo é composto pela seguinte proporção em volume: 60 % água, 25% glicerina e 15 % gelatina. Segundo Schiavon (2010, p 51) outros materiais poderiam ser usados, mas estes não apresentam sensibilidade suficiente para a aplicação em fotoelasticidade. Visto que o solo é um material muito deformável, sendo a rigor

visco-elástico, o material fotoelástico apresenta as melhores características que representam as magnitudes relativas das deformações de um caso real.

Uma das vantagens da análise de tensões por fotoelasticidade é a facilidade de se visualizar imediatamente as distribuições de tensões e deformações, os gradientes de deformação e a sua distribuição global, incluindo áreas sob alta ou baixa concentração de tensões e ainda verificar a importância relativa dos vários modos de aplicação de carga. Essa capacidade é chamada de “análise de campo complexo” e é exclusiva da fotoelasticidade dentre os métodos de análise de tensões. (DALLEY, 1991 apud SCHIAVON, 2010).

A “Fotoelasticidade de transmissão plana” é uma técnica muito utilizada na validação ou verificação experimental de soluções numéricas, no estudo de distribuição de tensões em problemas de geometria e carregamentos complexos, bem como na otimização de formas na análise de soluções alternativas. (SCHIAVON, 2010). Este será o tipo de transmissão aqui aplicada.

2 LUZ POLARIZADA

A luz polarizada, diferentemente da luz branca, se propaga em somente num plano (fig. 1).



Figura 1 - Polarização da luz branca (modificado de Schiavon, 2010)

Para polarizar uma fonte de luz utilizam-se filtros polarizadores que são folhas de polímero que contém moléculas longas. De modo que quando a luz despolarizada passa por essa folha, as componentes do campo elétrico paralelas às

moléculas conseguem atravessá-las, mas as componentes perpendiculares às moléculas são absorvidas e desaparecem. O campo eletromagnético que passa pelo filtro contém somente uma direção, o que significa que a luz está polarizada (HALLIDAY; RESNICK, 2012, p.14).

A visão humana é limitada, tendo certa sensibilidade relativa a radiações de vários comprimentos de onda, sendo esses limites aproximadamente 430 e 690 nm. (HALLIDAY e RESNICK, 2012, p. 2), com um pico na região de 550nm, correspondente à luz monocromática verde (fig. 2).

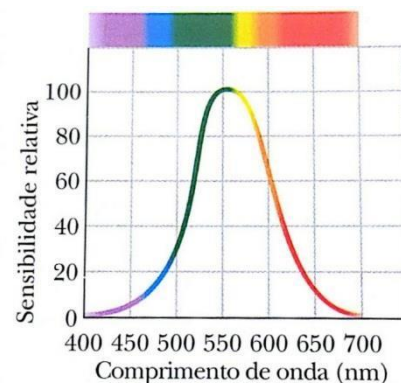


Figura 2 - Sensibilidade relativa do olho humano a ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de ondas.

Fonte: Halliday e Resnick, 2012, p.2.

Assim, um recurso utilizado no estudo é o uso de um filtro de luz verde, também usado por Schiavon (2010), dado que o olho humano apresenta maior sensibilidade a esta.

2.1 Polarizadores

Para polarizar a luz são necessários dois filtros, o primeiro filtro é chamado de polarizador, para absorver as ondas de luz não paralelas ao eixo polarizador, e o segundo o analisador, geralmente colocado com seu eixo de polarização perpendicular ao do polarizador. (SCHIAVON, 2010, p.22)

2.1.1 Padrões de franjas

A variação de tensões internas do material, nesse caso causadas pelos esforços transmitidos pelo modelo de sapata, formam franjas de cores

distintas e para cada valor de tensão aplicada haverá uma cor correspondente (fig. 3). Pode-se interpretá-las da seguinte forma: áreas de franjas finas com pequenos espaçamentos significam regiões de gradientes excessivos de tensões e de altas tensões. Grandes áreas onde o padrão é quase uniforme negro, ou cinza, geralmente indicam regiões não tencionadas (SCHIAVON, 2010, p. 41). Utilizando a luz branca, pode-se distinguir os dois tipos, sendo que as isoclínicas são negras e as isocromáticas são coloridas, exceção feita à isocromática de ordem zero que possui coloração negra (SCHIAVON, 2010).

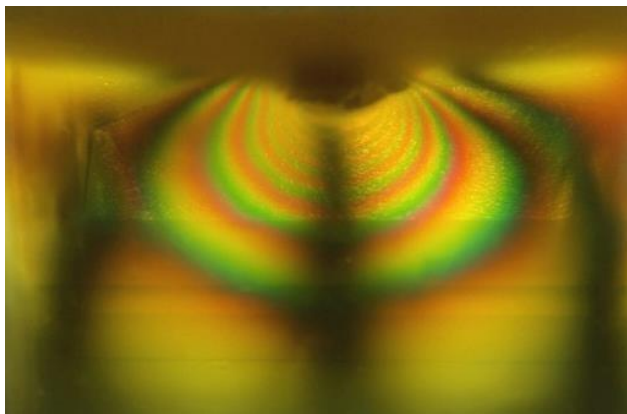


Figura 3 - Isocromáticas formando o bulbo de tensões devido à aplicação de carga sobre um dos modelos de sapata quadrada de 5 mm de lado. Fonte: Autores.

As franjas isoclínicas têm a mesma direção das tensões principais e que coincidem com as direções de polarização do polariscópio. São faixas escuras (OLIVEIRA, 1988 apud SIQUEIRA, 2008). Já as franjas isocromáticas são regiões em que a diferença entre tensões se dá de modo constante para um modelo bidimensional. Na primeira aplicação de carga as isocromáticas indicam regiões de máxima tensão; já nas aplicações posteriores ocorre espalhamento de cores ao redor da peça. Sob a luz branca as isocromáticas serão faixas coloridas; se a fonte de luz for monocromática as isocromáticas se apresentarão em faixas escuras (SCHIAVON, 2010).

De modo geral as franjas isocromáticas são numeradas de acordo com a ordem em que aparecem após sucessivas solicitações, sendo contínuas em sequência e não se interceptam. É possível extrair os valores de tensão de

cisalhamento máxima e diferença de tensões a partir dos dados do polariscópio e das propriedades fotoelásticas do material com as equações apropriadas (SCHIAVON, 2010). Convém notar que um tanque de pequena largura facilita a passagem da luz, porém cria zonas de interferência escuras quando se usam modelos de sapatas relativamente grandes, como se pode ver na Figura 3. Contudo, a formação e visualização dos bulbos de tensão fica ainda assim evidente, mostrando a viabilidade do método.

3 DIMENSÕES DAS SAPATAS E DO TANQUE

A fundação objeto do presente trabalho é do tipo superficial, também chamada fundação rasa ou direta. A forma da sapata escolhida para o estudo é a quadrada, de modo que se tenha a mesma distribuição de tensões nas duas direções paralelas aos lados da sapata modelo. As dimensões do modelo e do tanque devem ser tais que reduzam a possibilidade de um efeito de fronteira nas análises, o que mudaria as condições de contorno em relação às condições teóricas. Essas dimensões serão discutidas a seguir, mediante a análise da distribuição de tensões.

3.1 Bulbos de Tensão

Interessa especificamente analisar o que ocorre durante o processo de carregamento, ou seja, a formação dos bulbos de tensão pré-ruptura do solo. Os bulbos têm a sua forma dependendo do tipo de carregamento bem como as características do solo. A teoria da elasticidade prevê a alteração no estado de tensões, devido ao carregamento, indefinidamente, porém o acréscimo de tensões diminui com a profundidade e com o afastamento lateral da borda do tanque. Em termos práticos considerasse o bulbo de tensões até 10% da carga aplicada, a partir desta isóbara negligencia-se o efeito do carregamento no solo. Quando as condições de contorno do problema analítico se aproximam das condições de contorno “in situ”, a distribuição de tensões no campo são

comparáveis àquelas obtidas pela análise linear elástica (GONÇALVES et.al, 2014).

3.2 Equações da Elasticidade e o Dimensionamento do Tanque

Diversos autores desenvolveram soluções para a distribuição de tensões para diversas geometrias de fundações diretas superficiais com as equações da teoria da elasticidade, praticamente todas partindo da integração da equação de Boussinesq. O modelo tomado para a análise comparativa neste estudo é o dos ábacos de Newmark apud Bowles (1997), sobretudo para comparação com os bulbos de tensão experimentais.

Para definição das dimensões do tanque foram consideradas análises mais recentes que utilizam o método dos elementos finitos, como o trabalho de Hammouni e Charlier (2003, p. 218). Estes autores colocam como condições de contorno elementos deslizantes nas fronteiras indicando que devem ser consideradas a cerca de $5,5B$ (fig. 4), pouco maior do que o valor $4B$ admitido pelos ábacos como os de Newmark. Foi esse valor maior o adotado para dimensionamento do tanque fotoelástico em relação ao modelo de sapata, de modo que o tanque possa comportar dois modelos próximos um ao outro em sua largura sem interferência das suas paredes nas análises.

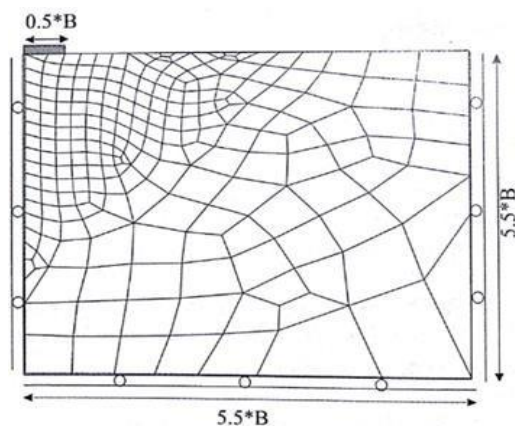


Figura 4 - Configuração geométrica dos modelos de elementos finitos. (Hammouni e Charlier, 2003, p 218)

A partir das análises e tentativas empreendidas, a sapata adotada nos ensaios foi de dimensões 5mm x 5mm de base (fig. 5), pois permitiu uma

boa visualização dos bulbos de tensões em um tanque de 450mm x 120 mm x 200 mm. Isso trouxe economia no consumo de glicerina e permitiu um bom resultado nas imagens.



Figura 5 - Sapatas quadradas de 5 mm de aresta utilizadas nos ensaios. Fonte: Autores.

Além de comparar os bulbos experimentais com os teóricos da teoria da elasticidade, o objetivo principal do trabalho é identificar a forma da interação entre os bulbos resultantes em função da distância entre duas sapatas próximas.

4 EQUIPAMENTO E MATERIAL DE ENSAIO

O preparo do material fotoelástico é realizado com a adição de gelatina em água destilada fria em um Becker e deixando descansar por 10 minutos. Após este tempo o Becker é levado ao aparelho de banho maria, aonde permanece até que a mistura alcance 60°C . Ao se alcançar tal temperatura a mistura é retirada do aparelho e adiciona-se glicerina. Com o auxílio do termômetro se monitora a temperatura do material, até a temperatura de 35°C , quando a mesma se encontra apta para a transferência para o tanque de acrílico. Antes de receber o material fotoelástico as paredes do tanque devem ser lubrificadas com graxa de silicone, para se evitar a adesão entre a gelatina e as paredes. Para realizar o ensaio é preciso aguardar o resfriamento total do material. Todo o equipamento de ensaio foi projetado e construído

pelos autores com apoio da oficina da universidade.

Detalhes do equipamento construído para o ensaio podem ser vistos nas figuras 6 a 9:

a) Cuba de luz - A luz não polarizada interfere negativamente no ensaio, portanto é importante que somente a luz polarizada passe pelo material fotoelástico (fig. 6 e 7).



Figura 6 - Visão lateral da cuba e mesa (Autores).



Figura 7- Visão frontal da cuba e mesa (Autores).

b) Sistema de aplicação de carga: desenvolvido com o intuito de manter o controle e a uniformidade do carregamento. É constituído de uma peça de madeira horizontal com furação para posicionamento dos modelos de sapatas, ligada a duas barras verticais de metal reforçadas com uma mão francesa para garantir 90° entre elas (fig. 8).



Figura 8 – Sistema de aplicação de carga (Autores).

d) Tanques de acrílico: foram confeccionados dois tanques de acrílico, o modelo 1 com 140mm x140mm x 140mm (Figura 9) e o modelo 2 com 450mm x 120 mm x 200 mm.

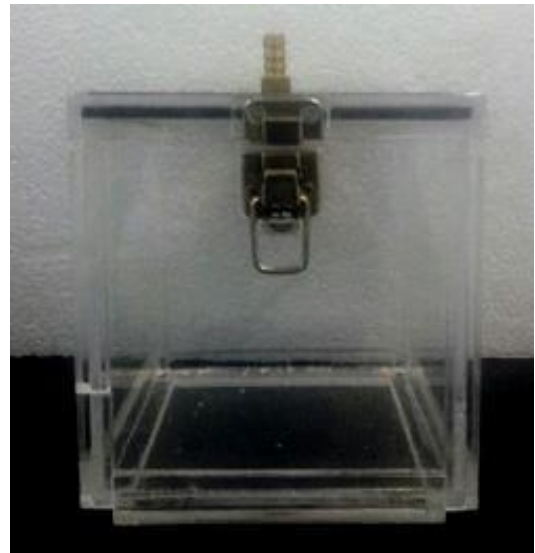


Figura 9 - Tanque de acrílico (Autores).

Este sistema permitiu a visualização da interação entre os bulbos e a partir de qual distância relativa a interferência entre os mesmos passa a ser desprezível.

5 RESULTADOS

As figuras 10 a 13 mostram imagens resultantes do posicionamento das sapatas fixadas ao sistema de distribuição de cargas. As distâncias foram tomadas com paquímetro e são apresentados seus valores exatos e não os nominais (exemplo: 29 mm medido tem o valor nominal de 30 mm).



Figuras 10 - Interação entre os bulbos de tensões dos modelos de sapatas de 5 mm a 29mm de distância.

Note-se que na figura 10 é perfeitamente visível que a interação entre as sapatas colocadas a uma distância da ordem de $29\text{mm}/5\text{mm} \cong 6B$ apresentam interferência nos bulbos de tensões na região entre as duas e a tendência de formação de um único bulbo que engloba região no entorno delas.



Figuras 11 - Interação entre os bulbos a 49mm de distância. Fonte: Autores.

Na figura 11 nota-se que a uma distância $49/5 \cong 10B$ a interação dos bulbos entre as sapatas ainda ocorre, porém em menor escala. Já o bulbo de envoltória que tendia a se formar em torno das duas sapatas já não é tão expressivo. É possível ver também que próximo à superfície há ainda

uma franja de interação na região entre as duas sapatas.



Figuras 12 - Interação a 69mm de distância.

A figura 12 mostra que a uma distância de $69/5 \cong 14B$ resulta quase nenhuma interação entre os bulbos. Próximo à superfície ainda é possível visualizar alguma franja entre as duas sapatas.



Figuras 13 - Interação a 69mm de distância.

Finalmente, na figura 13, a uma distância de $89/5 \cong 18B$ apenas alguma interação próxima à superfície ainda é visível.

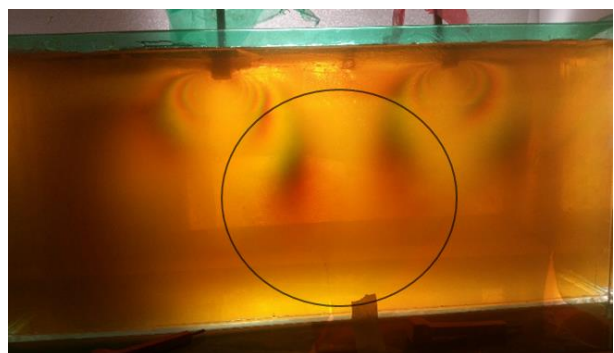


Figura 14 - Vista geral do tanque durante ensaio das sapatas a 150 mm de distância. Fonte: Autores.

A figura 14 mostra uma vista mais geral do tanque utilizado com as sapatas posicionadas a

150 mm de distância, ou seja, a 30B. A interação entre as mesmas próximo à superfície é agora praticamente nula, mostrando a independência dos bulbos de tensão formados.

5.1 Comparação dos bulbos experimentais com a teoria da elasticidade

Afim de se verificar a possibilidade de análise quantitativa das tensões a partir das imagens obtidas em sapatas isoladas, o bulbo de tensões teórico de uma sapata quadrada segundo Bowles (1997) foi sobreposto ao bulbo da figura 3 (ver fig. 15).

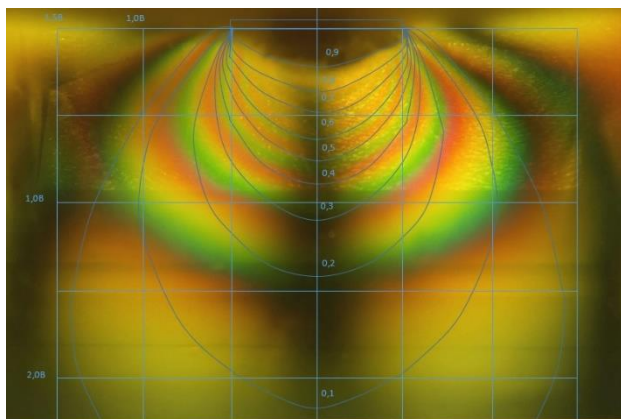


Figura 15 – Comparação do bulbo experimental com o teórico (Bowles, 1997) para o modelo de sapata de 5mm.

Verifica-se na Figura 15 que há uma diferença significativa na proporção dos bulbos experimentais em relação ao esperado teoricamente para uma sapata quadrada pela teoria da elasticidade, aplicada a um meio isotrópico. Desta forma, pode-se supor que há no material fotoelástico preparado um fator de anisotropia na direção vertical o qual deve ser melhor investigado.

Uma das hipóteses a ser investigada é de que o material fotoelástico apresente anisotropia devido ao seu peso próprio, o qual não é considerado na teoria da elasticidade, cujas equações consideram o meio sem peso. Outra possibilidade é o gradiente de perda de temperatura para o ambiente durante o resfriamento, o qual é diferencial verticalmente em relação ao horizontal.

Numa tentativa de quantificação dessa anisotropia a escala do gráfico dos bulbos de tensão teórico foi reduzida na vertical de um fator

2, ou seja, proporcionalmente para a metade da sua altura. O resultado está na figura 16.

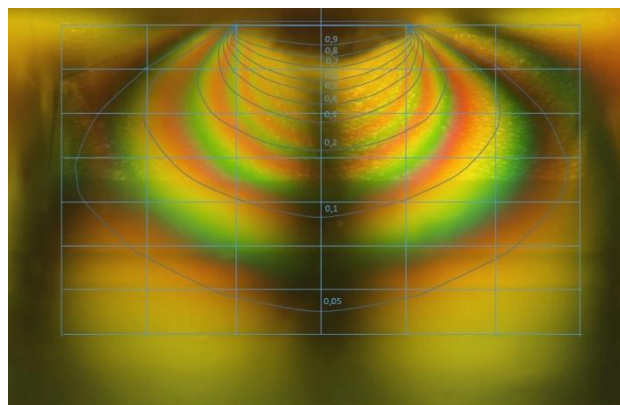


Figura 16 – Comparação do bulbo experimental com o teórico (Bowles, 1997) para o modelo de sapata de 30mm.

A figura 16 mostra que com uma proporção de 1:2 da escala vertical para a horizontal há um melhor ajuste da forma dos bulbos teóricos em relação aos experimentais, ao menos para a isóbara de 10% da tensão aplicada. Para profundidades menores a concordância não é tão boa, podendo indicar um fator variável para anisotropia vertical. Essa hipótese estaria coerente com a possibilidade do peso próprio e/ou da temperatura influenciarem no resultado. Trata-se, contudo, de uma nova questão para continuidade da pesquisa.

5.2 Proposta de método para observação simultânea dos deslocamentos verticais

Como proposta de método para observação dos deslocamentos verticais do solo simultaneamente às tensões, moldou-se nova mistura em tanque cúbico de 140 mm de aresta onde se instalaram fios de nylon colorido a cada 10 mm de profundidade. As sapatas de aresta 5 mm foram instaladas a uma distância de 40 mm ($40/5=8B$) conforme a Figura 17.

As linhas tracejadas da Figura 17 indicam a posição original os fios de nylon, inicialmente esticados, sendo possível verificar na vertical do centro das sapatas o deslocamento dos mesmos, demonstrando o recalque sofrido no interior do material. Essa primeira tentativa inovadora na técnica de fotoelasticidade, neste tipo de ensaio, encoraja a serem feitas avaliações do campo de

deformações juntamente com as tensões em análises futuras.

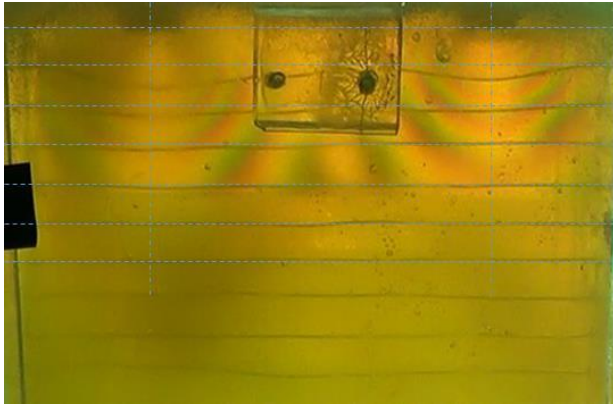


Figura 17- Deformação do material sob as sapatas e aresta 5mm à distância de 40 mm.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a aplicação da técnica de fotoelasticidade para modelagem do comportamento de fundações por sapatas, particularmente objetivando o estudo da interação entre os bulbos de tensões de sapatas próximas.

As dimensões do tanque utilizado e proporção dos modelos de sapatas permitiram a obtenção de imagens nítidas sem grande interferência das paredes do mesmo (efeito de fronteira). Foi possível observar a interação entre os bulbos de tensões de sapatas na região próxima à superfície mesmo a distâncias de $18B$ (B =aresta das sapatas) entre as sapatas. O bulbo de envoltória das duas sapatas foi perceptível nas imagens até a distância de $6B$.

A uma distância de $30B$ os bulbos de tensão dos modelos de sapatas se comportaram como o de sapatas isoladas.

A comparação dos bulbos de tensão obtidos nas imagens em comparação com os gráficos teóricos, com base na Teoria da Elasticidade para sapata quadrada, mostra que deve haver um efeito de anisotropia vertical no material fotoelástico usado, provavelmente devido ao seu peso próprio ou ao gradiente vertical de temperatura durante o seu resfriamento. Esse efeito será investigado futuramente.

A proposta de visualização dos deslocamentos verticais simultaneamente às franjas de tensões mostrou-se também promissor para estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI e à FAPESP pelo auxílio à apresentação desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Detilli, C. M. (2013) Tanque de material fotoelástico para análise do campo de tensões de modelos de fundações por sapatas. 38p. (Iniciação Científica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2013.
- Halliday, D; Resnick, R; Walker, J. (2012) Fundamentos de física, volume 4, edição 9, LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hammouni, E; Chalié, R. (2003) Modélisation d'une semelle fiante de fondation: influence de la règle d'écoulement, de l'angle de lode et du maillage. In : SYMPOSIUM INTERNACIONAL SUR LES FONDAIONS SUPERFICIELES, volume 1. Tópico temático. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, França, 218p.
- Schiavon, J. (2010) Aplicação da técnica da fotoelasticidade na análise de fundações por estacas helicoidais. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado em geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil. <http://www.eesc.usp.br/geopos/dissertes/joseschiavon.pdf> > Acedido em: 15 de fev. 2014
- Siqueira, D. P. P. de (2007) Análise fotoelástica de modelo de vértebra sob influência de parafuso pedicular. Dissertação (Mestrado em Ortopedia, Traumatologia e Reabilitação) - Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil. <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/17/17142/tde-28052008-142816/>> Acedido em: 2 de out. 2014
- Torres, Érica Miranda de. (2008) Análise fotoelástica das tensões geradas por diferentes planejamentos de próteses parciais fixas parafusadas sobre implantes cone morse. 115 f. Tese (Doutorado em Reabilitação Oral) - Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, Brasil.