

Análise do Comportamento de Patolamento de Guindaste e Plano de Rigging para uma obra em Santo André (SP)

Tiago de Jesus Souza

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

André Querelli

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

RESUMO: Este artigo baseia-se no caso real de uma obra situada na avenida Presidente Costa e Silva, nº 1173, no município de Santo André, SP, no qual foram instalados guindastes para auxiliar na locomoção de grandes cargas. Para uma avaliação completa e de confiabilidade de resultados, o recalque foi calculado por três abordagens: modelagem elastoplástica 2D, modelagem elástica 3D e analítica. Além da curva carga x recalque obtida no ensaio de placa foi feito também as curvas carga x recalque com metodologias numérica e analítica. A luz da análise comparativa conclui-se que a modelagem 2D e 3D ficaram mais aderente aos resultados dos ensaios de placa sendo que o método analítico tiveram resultados mais conservadores.

PALAVRAS-CHAVE: Recalques, Guindaste, Plano de Rigging, Fundação, Modelagem numérica.

ABSTRACT: This article is based on the real case of a construction project located at Avenida Presidente Costa e Silva, No. 1173, in the municipality of Santo André, SP, where cranes were installed to assist in the movement of heavy loads. For a comprehensive and reliable assessment of results, settlement was calculated using three approaches: 2D elastoplastic modeling, 3D elastic modeling, and analytical modeling. In addition to the load-settlement curve obtained from the plate load test, load-settlement curves were also generated using numerical and analytical methodologies. Through a comparative analysis, it is concluded that the 2D and 3D modeling approaches closely aligned with the plate load test results, while the analytical method yielded more conservative outcomes.

KEYWORDS: Settlements, Crane support, Rigging Plan, Foundation, Numerical modeling.

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Guindastes são equipamentos de grandes dimensões que são capazes de suportar e deslocar elevadas cargas. Estes equipamentos executam simultaneamente o transporte no solo, a elevação, o transporte sobre laje e, por fim, depositam no local exato a carga transportada (CARDÃO, 1983). Por isso, propiciam enorme contribuição no sentido de otimizar tempo e mão de obra na indústria da construção civil (Figura 1).

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



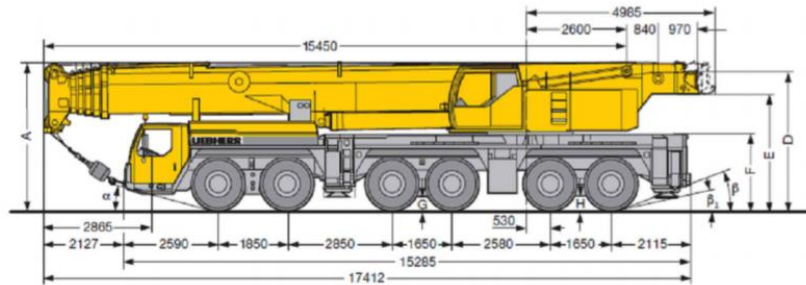


Figura 1. Desenho Esquemático do modelo de guindaste LIEBHERR LTM 1250

As cargas advindas da operação dos guindastes são transferidas para o solo através de suas patolas (Figura 2), que são elementos, em geral metálicos, apoiados diretamente no terreno, que servem de base para os guindastes transferindo carga ao terreno com segurança. É recomendável que esses elementos tenham caráter “rígido”, de modo a transmitir os esforços uniformemente ao solo. É atribuição do fabricante/fornecedor dos guindastes providenciar tal acessório executivo.

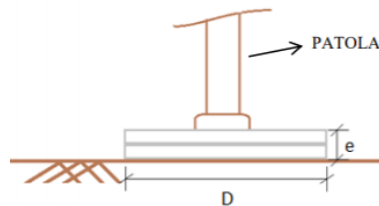


Figura 2. Detalhe da patola sobre duas placas de aço

É de extrema importância o planejamento para a correta utilização de um guindaste, uma vez que seu uso indevido pode causar tombamento do mesmo, impossibilitando o cumprimento do cronograma físico-executivo da obra, danos materiais e, o que é mais relevante, a possível perda de vidas. A NBR-6122/2019 estabelece que a pressão admissível para fundação direta seja definida em função dos dois critérios: segurança quanto à ruptura e recalques admissíveis, compatíveis com as características do projeto; e pelos seguintes métodos: Métodos teóricos, Prova de carga sobre placa, Métodos semi-empíricos e Métodos empíricos.

1.2 Previsão de Recalques

Os métodos para estimativa de recalques de fundações diretas comumente utilizados na prática geotécnica são semi-empíricos, utilizando resultados dos ensaios de campo e combinam os fundamentos da teoria da elasticidade (Nova e Montrasio, 1991; Fellenius e Altaee, 1994).

Por meio de análises teóricas, estudos em modelos, e simulações pelo método dos elementos finitos, Schmertmann, (1970) observou que a deformação máxima não ocorre no contato com a base da sapata, mas a uma certa profundidade, em torno de $z = B/2$, onde B é a largura da sapata. A partir dessa profundidade, as deformações diminuem gradualmente e podem ser desprezadas para profundidade $z=2B$. Como consequência disso, o autor propõe uma distribuição triangular do fator de influência na deformação, para o cálculo de recalque de sapatas rígidas em areias, conforme apresentada na Figura 3.

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



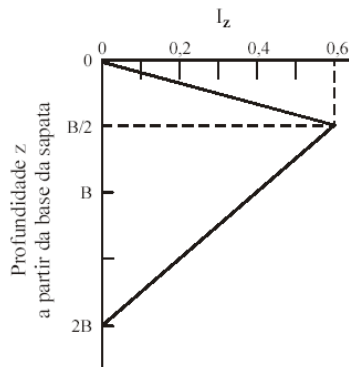


Figura 3. Fator de influência na deformação vertical. (Schmertmann, 1970)

Considerando que um maior embutimento da sapata no solo pode reduzir o recalque em até 50%, o autor define um fator de correção do recalque C_1 , dado por:

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{q}{\sigma^*} \right) \geq 0,5 \quad (1)$$

Onde:

q = tensão vertical efetiva ($\gamma \times z$);

σ^* = tensão líquida aplicada pela sapata ($\sigma^* = \sigma - q$)

Portanto, essa redução não ocorre quando a sapata se encontra à superfície do terreno ($q=0$) e é máxima quando a profundidade de embutimento resulta $q = \sigma/2$ (ou $q = \sigma^*$).

O monitoramento do comportamento das sapatas em areia mostra que além do recalque imediato, outra parcela se desenvolve com o tempo, como fenômeno de *creep*, ou a semelhança da compressão secundária em argilas. Por isso, o autor adota um outro fator de correção C_2 :

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (2)$$

Onde:

t = tempo expresso em anos.

Finalmente, o recalque de sapatas rígidas em areia é dado pelo somatório das deformações:

$$\sum \rho_i = C_1 C_2 \sigma^* \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_s} \Delta Z \right)_i \quad (3)$$

Onde:

I_z = fator de influência na deformação à meia altura da i -ésima camada

(com no máximo duas decimais);

E_s = módulo de deformabilidade da i -ésima camada;

ΔZ = espessura da i -ésima camada;

C_1 = fator de correção do recalque;

C_2 = parcela de recalque que se desenvolve com o tempo;

σ^* = tensão líquida aplicada pela sapata.

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



Deve-se destacar que o uso da tensão líquida é justificável porque a parcela correspondente à sobrecarga q representa a reposição do alívio de tensões provocado pela escavação e, portanto, não deve gerar recalque.

1.3 Provas de Carga

A previsão de comportamento de elementos de fundação direta não é uma tarefa trivial, sobretudo nas avaliações de recalques em casos em que não há amostras indeformadas para execução de ensaios especiais.

A prática atual da engenharia emprega ensaios de campo, usualmente sondagens a percussão (SPT) e as provas de carga em placa. A difusão da execução de ensaios de placa como ferramenta de projeto e de controle de qualidade se referencia à norma da ABNT NBR 6489, que preconiza que a prova de carga seja executada em placa de área igual ou superior a $0,5 \text{ m}^2$.

2 Características do local

2.1 Aspectos Gerais

Para elaboração deste estudo, o guindaste adotado em obra foi do tipo LIEBHERR LTM 1250 que é suportado por quatro placas metálicas (patolas) que recebem carga provenientes de seus pesos próprios, bem como as cargas de içamento quando da utilização dos mesmos. A Figura 4 exemplifica o local do estudo destacando em vermelho sua localização aproximada:



Figura 4. Local de estudo

2.2 Caracterização Geotécnica

Avaliando as duas sondagens locais (Área 1 e Área 2) e as condições de patolamento, o estudo foi conduzido baseado em duas regiões distintas, relacionadas com as sondagens da obra.

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



Cada região foi dividida de acordo com uma sondagem e perfil de subsolo típico-representativo. Ambas as regiões estão mostradas a seguir:



Figura 5. Regiões de análise (áreas 1 e 2)

Ambas as sondagens apresentam subsolo semelhante em termos de material, porém com compacidades/consistências distintas. A sondagem SP-01 possui uma camada de aterro argilo-arenoso de consistência muito mole com 4,7m de espessura, seguido de argila arenosa média a rija com 4,2m de espessura, um horizonte de argila areno-siltosa média a dura com 9m de espessura e finaliza com camada de argila silto-arenosa média a dura com N_{spt} crescente até o término, aos 26,4m. Nível d'água a 5,7m.

A sondagem SP-02 possui camada de aterro argilo-arenoso de consistência mole à dura com 12m de espessura e N_{spt} crescente, seguido de uma lente de areia medianamente compacta e argila areno-siltosa rija a dura com mais 5m de espessura. O furo segue com argila arenosa dura com N_{spt} crescente até o término, aos 30,3m. Nível d'água a 5,6m.

3 Cálculo dos Recalques

Para uma análise completa e de confiabilidade de resultados, o recalque foi calculado por três abordagens: (a) modelagem elastoplástica 2D; (b) modelagem elástica 3D; e (c) analítica.

Além da curva carga x recalque obtida dos ensaios de placa, foram também plotadas curvas tensão x recalque com as metodologias numérica e analítica supramencionadas.

3.1 Método Analítico

As análises analíticas de previsão de recalque foram feitas através do método de Schmertmann et al. (1978). Os resultados para as duas áreas são apresentados na Figura 6.

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



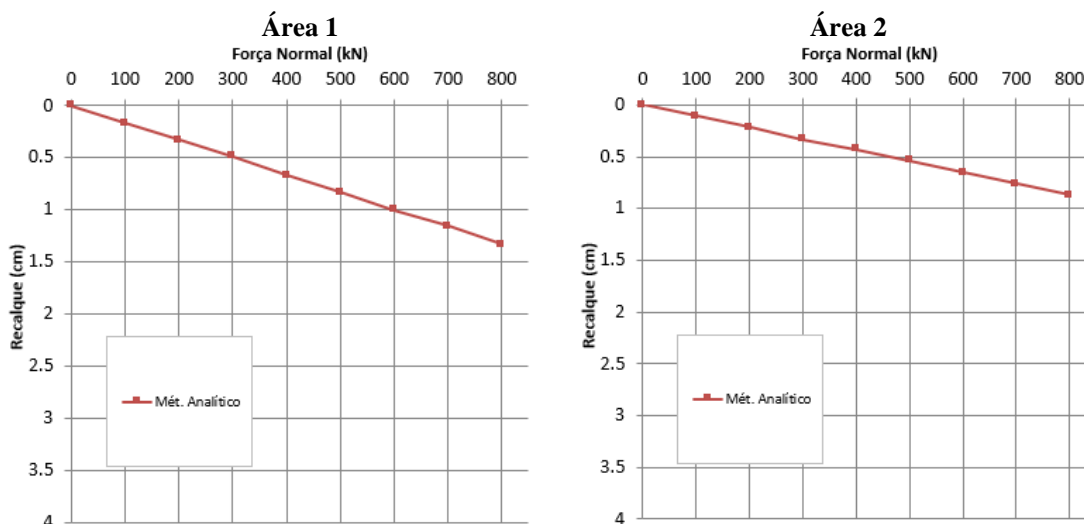


Figura 6. Força x Recalque estimadas para as duas regiões com o Método Analítico

Para as modelagens numéricas em elementos finitos foram adotadas considerações de estado plano de deformação. Essa condição é muito utilizada para análise de obras geotécnicas (barragens, túneis, fundações corridas, etc.) e envolve as seguintes hipóteses sobre geometria, carregamento e parâmetros constitutivos: uma das dimensões do corpo é muito maior do que as outras duas, permitindo que uma seção transversal qualquer possa ser considerada como “seção de simetria”. Consequentemente, apresentam-se deformações nulas ortogonalmente ao plano XY da Figura 7 e os parâmetros elásticos não variam ao longo da maior dimensão do corpo.



Figura 7. Detalhe das patolas em relação aos eixos considerados no Plaxis 2D

3.2 Modelagens Numéricas

3.2.1 Modelagem em Elementos Finitos (FEM) Bidimensional - Elastoplástica

Utilizou-se o software Plaxis2D. Trata-se de um software de elementos finitos que foi desenvolvido pela Universidade Tecnológica de DELFT, Holanda. O software tem por uma de suas finalidades a análise de tensão - deformação e verificação de estabilidade em problemas de Geotecnia, BRINKGREVE, R. B. J. (2002).

O comportamento dos elementos que compõe o modelo numérico, quando sujeitos a variações de tensões é governado pelo modelo constitutivo adotado. Para elaboração deste estudo utilizou-se Mohr-Coulomb.

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



As patolas do guindaste foram modeladas isoladas, como mostra a Figura 8, com a análise por meio do perfil típico da sondagem SP1 (Área 1), exemplo de 50 tf aplicadas sobre a patola. A mesma análise foi realizada para outra área e os resultados constam plotados na Figura 9.

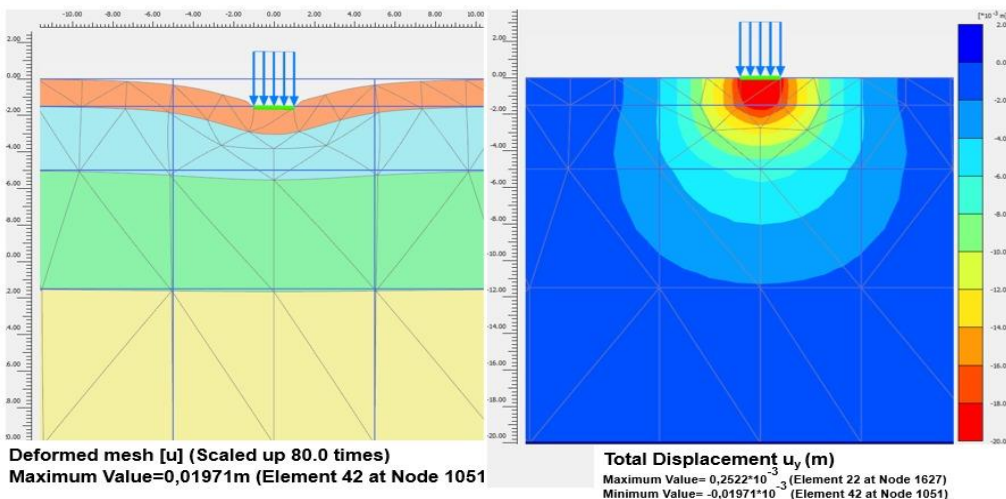


Figura 8. Modelagem elástoplastica 2D – Região SP1 / Área 1

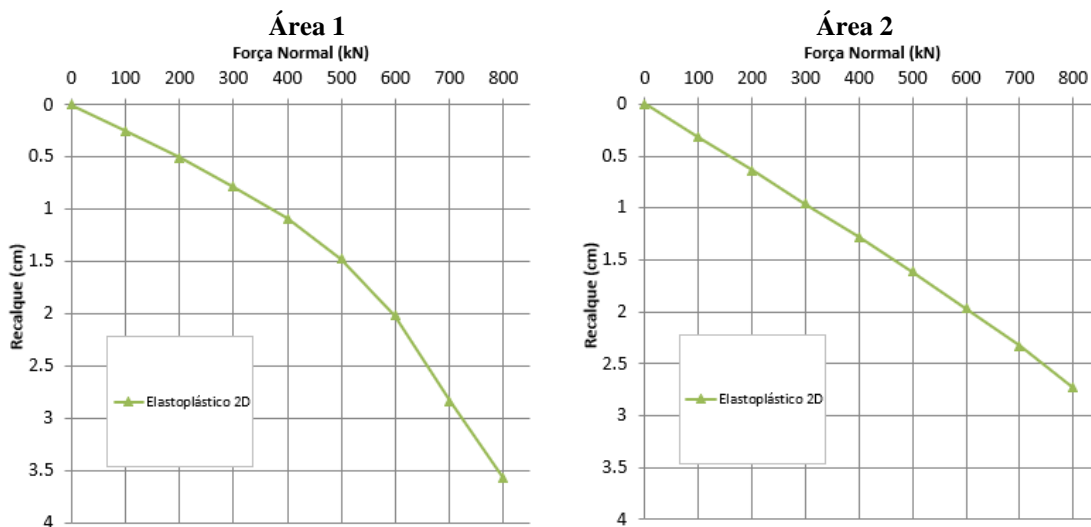


Figura 9. Força x Recalque estimadas para as duas regiões com a modelagem bidimensional (2D) em Elementos Finitos

3.2.2 Modelagem Tridimensional - Linear-Elástica

A modelagem tridimensional elástica foi executada no software Settle3D, da Rocscience. Esse programa realiza os cálculos de recalques sob fundações, aterros e carregamentos superficiais (ROCSCIENCE, 2009). A simulação numérica pode incluir diversos estágios e o cálculo de adensamento pode considerar recalques primários e secundários (fluência). Diversos materiais, lineares e não lineares, podem ser modelados para compor o perfil do terreno.

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



O algoritmo do software calcula, primeiramente, as tensões efetivas do terreno especificado e depois computa as deformações consequentes em função do tipo de material adotado para cada camada do subsolo.

Na análise, considerou-se as quatro patolas simultaneamente, de modo que foi perceptível que os bulbos de tensão não influenciaram uns nos outros pela grande distância entre apoios. Um exemplo de cálculo para a Área 2 é apresentado na Figura 10 (modelo com 10tf por patola). A mesma análise foi realizada para outra área e os resultados constam plotados na Figura 11.

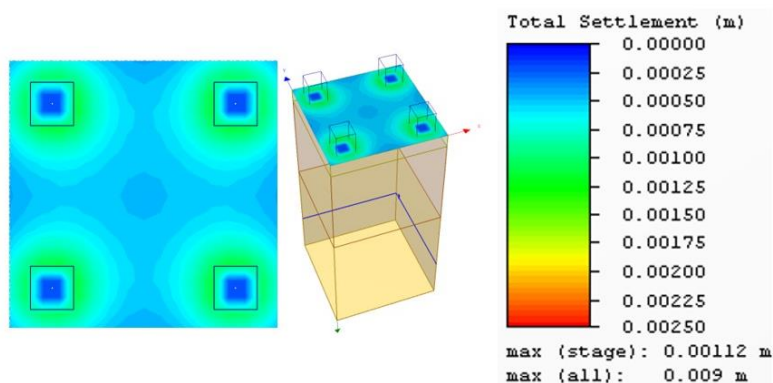


Figura 10. Modelagem elástica 3D – Região SP3

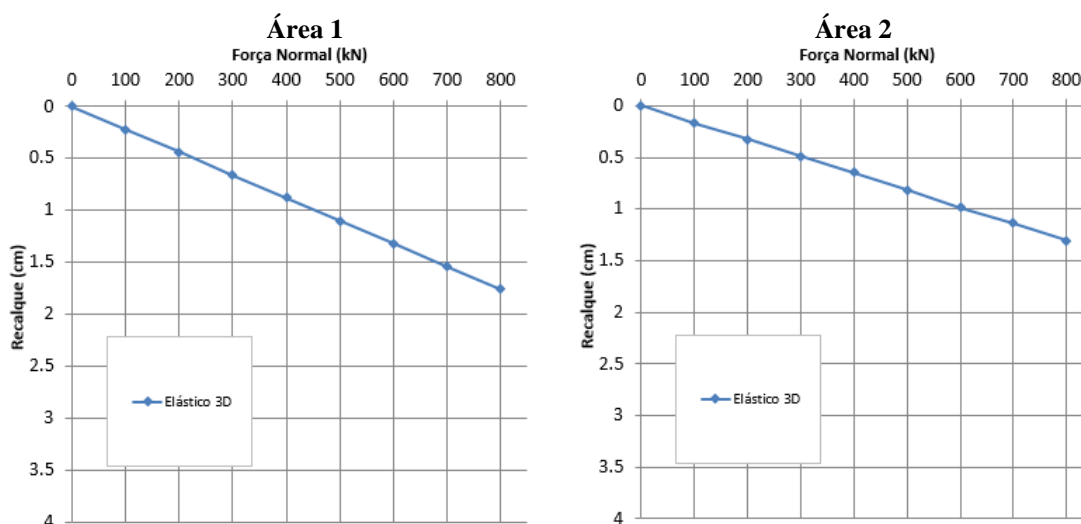


Figura 11. Força x Recalque estimadas para as duas regiões com a modelagem tridimensional

4 Provas de Cargas Realizadas

Conforme mencionado, foram realizadas duas Provas de Carga Estáticas em placa na obra em epígrafe – uma em cada área. A metodologia foi realizada em conformidade com a NBR 6489/2019 e as curvas dos ensaios constam plotadas na Figura 12.

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



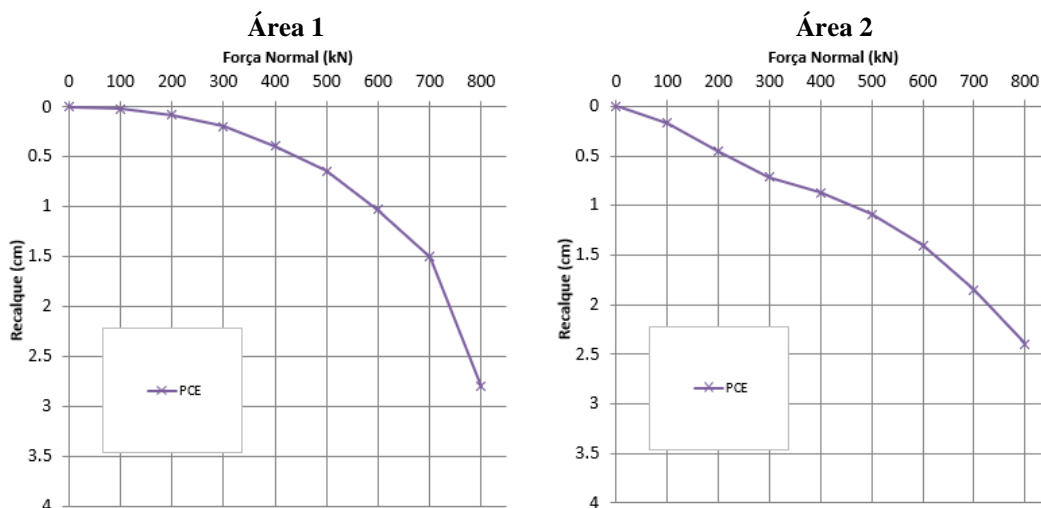


Figura 12. Força x Recalque para as duas provas de carga realizadas

O formato da curva de carregamento é praticamente linear, não apresentando nenhum comportamento assintótico de ruptura nítida. Isso indica que pode-se considerar que o solo carregado apresentou comportamento (no carregamento) ainda sob regime predominantemente elástico.

5 Comparação das Curvas

Baseado nos dados anteriores, plotou-se as curvas Força normal (na patola) x Recalque induzido ao solo das diversas frentes de modelagem para ambas as áreas. Os gráficos foram elaborados como *Output final* em termos de Força (e não tensão) para facilitar a análise do fornecedor do equipamento e adaptações do Plano de Rigging, pois já considerou apoio de cada patola sobre uma sapata de dimensões 2,0 x 2,0 m, junto à premissas descritas anteriormente. A Figura 13 mostra ambos os gráficos plotados (áreas 1 e 2), contendo todos os métodos calculados.

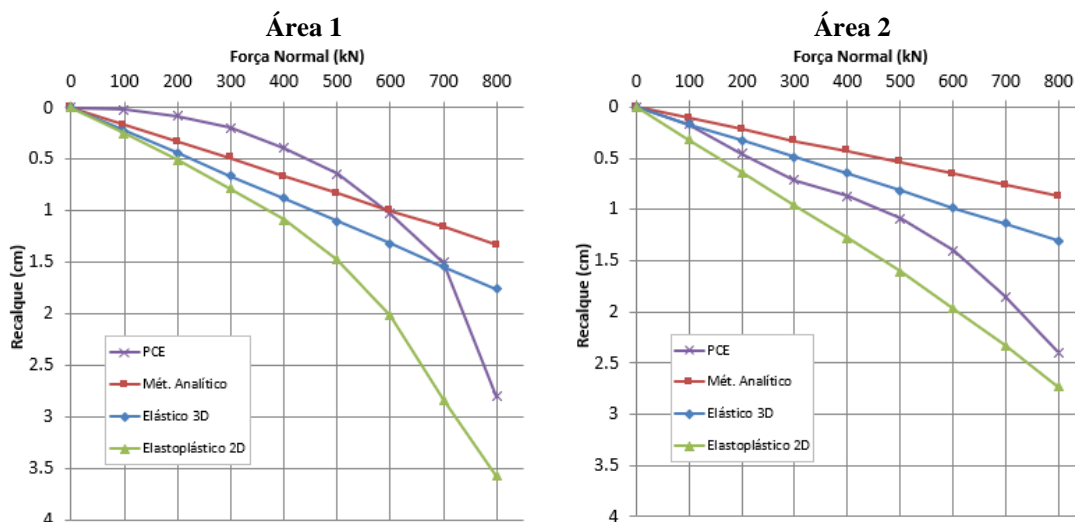


Figura 13. Curvas Carga na Patola x Recalque – Todos os métodos – Áreas 1 e 2

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



6 Conclusões

Os cálculos e modelagens acima permitem ao fabricante dos equipamentos de içamento das peças, em conjunto com o Plano de Rigging, avaliarem potenciais recalques diferenciais entre patolas e, principalmente, recalques distorcionais do guindaste frente às diferentes combinações de carga e angulação da lança dos guindastes durante o cumprimento das diretrizes de montagem estabelecidas para as estruturas.

Foi sugerido para a obra que fossem adotados os recalques calculados pelo modelo elastoplástico 2D – uma vez que a natureza plástica de, ao menos uma parte dos deslocamentos, apresenta uma abordagem mais realista do fenômeno de recalque potencial. Além disso foi a abordagem que mais se aproximou das provas de carga para os níveis de maior carga.

Em termos de solo, a equipe de campo, bem como o eng. geotécnico responsável foi orientado a inspecionar e garantir “in loco” a presença da camada de substituição do solo natural por aterro compactado com 1,5m de espessura que nos foi informada. Isso é imprescindível e essencial para permitir que as estimativas de recalque geradas nesse parecer sejam condizentes com a realidade física da obra. Sem esse mapeamento e confirmação os serviços não podem ser iniciados.

AGRADECIMENTOS

A **Solotechnique** agradece à Braskem pela confiança depositada em nossa consultoria ao projeto, por meio da modelagem numérica e definição quanto aos recalques esperados para suporte ao Plano de Rigging elaborado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- BRINKGREV, R. B. J., *Finite Element Code for Soil and Rock Analyses – PLAXIS– 2D user’s manual*, Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2002.
- CARDÃO, C., *Técnica da construção volume I*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1983.
- FELLENIUS, B. H.; ALTAEE, A. 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, 1994.
- NOVA, R.; MONTRASIO, L. *Settlements of shallow foundations on sand. Geotécnique 41*, No. 2, p. 243-256, 1991.
- ROCSCIENCE. *Settle3D: theory manual*. Toronto, 2009.
- SCHMERTMANN, J. H., ASCE, F., HARTMAN, J. P., BROWN, P. R., 1978, “Improved Strain Influence Factor Diagrams”, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, v. 104, n. GT8, pp. 1131-1135.

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

