

## Avaliação dos recalques de um tanque de água a partir de modelagem numérica em paralelo com solução analítica

Lucas Vilar da Silva

Estudante de pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
lucas.vilar@coc.ufrj.br

Willians Perley Alexandre da Silva

Estudante de pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
willians.perley@coc.ufrj.br

Matheus Cardoso Duarte

Estudante de pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,  
matheus.duarte@coc.ufrj.br

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, carminha.cavalcanti@coc.ufrj.br

Alexandre Duarte Gusmão

Professor, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, gusmao.alex@poli.br

**RESUMO:** É comum, na competência de obras geotécnicas, encontrar casos nos quais há incompatibilidade entre a previsão dos recalques e os valores medidos em campo ao longo da vida útil da obra. Dentre as diversas causas relacionadas a esses acontecimentos, é possível destacar a adoção de propriedades geomecânicas não representativas para o modelo de análise, ou, ainda, uma incompatibilidade entre o mecanismo do fenômeno idealizado na modelagem e o ocorrido em obra. Nesse sentido, o presente trabalho busca avaliar os recalques ocorridos em um tanque de água durante a realização de um teste de enchimento, comparando os valores obtidos ao longo das leituras dos pinos com os dados na simulação numérica. Para o desenvolvimento das análises, é adotado um modelo axissimétrico concebido no software de elementos finitos Plaxis 2D. Neste, é considerado um perfil típico para o terreno da fundação que obedece ao comportamento de um modelo com um domínio linear elástico regido pela Lei de Hooke e um domínio perfeitamente plástico com superfície de plastificação coincidente com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros utilizados nessas análises foram obtidos através de correlações com os resultados dos ensaios de campo, bem como de informações disponíveis na literatura sobre a estratigrafia da região. Os resultados demonstraram o impacto dos modelos constitutivos nos valores de recalques observados. Além disso, após considerar possíveis cenários relacionados às transmissões das tensões, os dados da análise foram validados com as medidas obtidas em campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Recalque, Estudo de Caso, Análise Numérica, PLAXIS.

**ABSTRACT:** It is common in the field of geotechnical works to find cases where there is a mismatch between the predicted settlements and the values measured in the field over the life of the work. Among the various causes related to these events, it is possible to highlight the adoption of non-representative geomechanical properties for the analysis model, or even a mismatch between the mechanism of the phenomenon idealized in the modeling and what occurred in the work. In this sense, this work seeks to evaluate the settlements that occurred in a water tank during a filling test, comparing the values obtained throughout the readings of the pins with the data in the numerical simulation. For the development of the analyses, an axisymmetric model conceived in the Plaxis 2D finite element software is adopted. In this, a typical profile for the foundation ground is considered that obeys the behavior of a model with a linear elastic domain governed by Hooke's Law and a perfectly plastic domain with a plasticization surface coinciding with the Mohr-Coulomb rupture

criterion. The parameters used in these analyses were obtained through correlations with the results of field tests, as well as information available in the literature on the stratigraphy of the region. The results demonstrated the impact of the constitutive models on the observed settlement values. In addition, after considering possible scenarios related to stress transmissions, the data from the analysis were validated with the measurements obtained in the field.

**KEYWORDS:** Settlement, Case Study, Numerical Analysis, PLAXIS.

## 1 INTRODUÇÃO

Caracterizado como um problema clássico da geotecnia, a previsão de recalques é uma análise fundamental para um bom desempenho de superestruturas. Em dependência das condições encontradas na investigação do terreno, diversas soluções podem ser adotadas (Gunerathne et al., 2018).

No caso em estudo, análises numéricas, com a utilização de dois distintos modelos constitutivos, junto à soluções analíticas obtidas, com hipóteses simplificadoras, a partir da Teoria da Elasticidade foram aplicadas em comparação com os resultados obtidos a partir do monitoramento dos recalques gerados por um teste de enchimento de um reservatório cilíndrico metálico.

Para as análises em duas dimensões dos tensores de tensões e de deformações pode, no software em uso, ser utilizada uma configuração que considera um estado plano de tensões, no qual as tensões com direção paralela ao vetor diretor do plano analisado são nulas, um estado plano de deformações, no qual as deformações com direção paralela ao vetor diretor do plano analisado são nulas, e o estado axissimétrico, no qual o problema é caracterizado por possuir um eixo de simetria — a partir do qual o plano estudado forma um sólido de revolução cujos deslocamentos na direção da circunferência são nulos (Azevedo, 2015)—, sendo este o estado utilizado para a modelagem do reservatório.

Destaca-se que para calibração e escolha do modelo constitutivo, nesse caso, há disponível, apenas, ensaios de SPT (Standard Penetration Test), junto à Sondagem de Simples Reconhecimento. O ensaio supracitado, no entanto, não busca descrever o comportamento mecânico do material do terreno de fundação com o comportamento que relaciona o estado de tensões aplicado ao estado de deformações geradas. Dessa forma, para a modelagem numérica, os ensaios foram utilizados para a obtenção de parâmetros, a partir de correlações, de resistência segundo o critério Mohr-Coulomb, que será utilizado como critério de ocorrência de plastificação do material no modelo elastoplástico utilizado.

## 2 METODOLOGIA

O problema analisado se refere a um tanque cilíndrico metálico para armazenamento de água com capacidade de 6.000 m<sup>3</sup>, com altura de 14,64 m, e características geométricas detalhadas na Figura 1. A fundação do tanque é composta por um anel de concreto armado e uma chapa, que faz parte do fundo do tanque, apoiada sobre um aterro de solo natural. As análises foram baseadas em um teste hidráulico realizado na estrutura, no qual foram feitos quatro estágios de carregamento, com a adição de 25% do volume total em cada. Para monitorar os recalques, foram instalados quatro pinos ao redor da estrutura, próximos ao topo do anel.

Os resultados apresentados na Figura 2 mostraram que os recalques finais do teste hidráulico variaram entre 144 e 155 mm, com uma média de 150 mm. Isso indica que não houve distorção significativa entre as extremidades dos apoios, sugerindo que as deformações ocorreram de maneira uniforme.

O desenvolvimento do estudo de caso partiu de análises computacionais com uso do software *Plaxis2D* fornecido pela empresa *Bentley Sequent* com os modelos linear elástico e, outro, linear elástico perfeitamente plástico, utilizando o critério de ruptura Mohr-Coulomb, e em paralelo aplicou-se o uso de soluções fechadas empregadas na Teoria da Elasticidade para fornecimento da distribuição de tensões e deformações. O emprego das premissas da teoria da elasticidade realizada sobre duas metodologias, uma aplicada às considerações de carregamento em borda de placa circular fornecida em Ahlvin e Ulery (1962) e as considerações de carga

aplicada em uma linha circular apresentada por Poulos e Davis (1973). O uso de soluções fechadas forneceram resultados utilizados na calibração do modelo computacional.

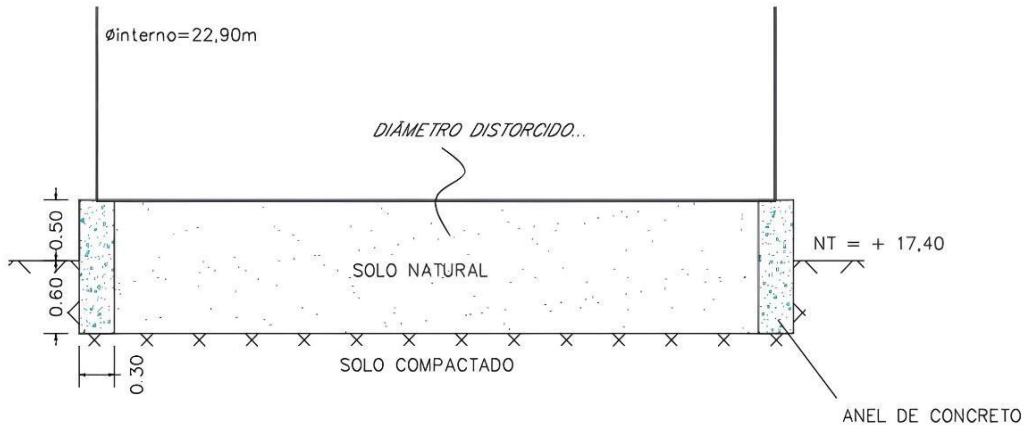


Figura 1. Características da geometria do tanque.

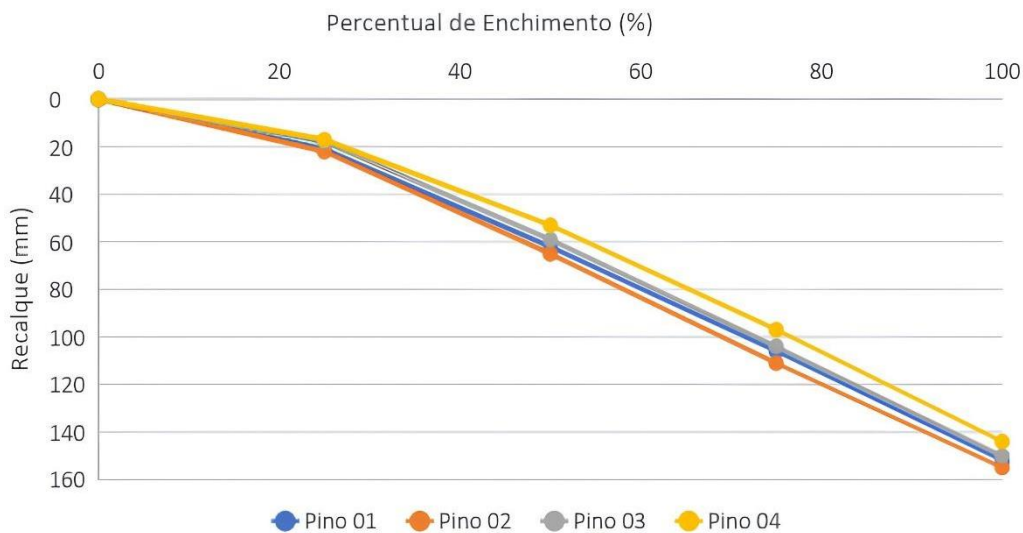


Figura 2. Resultados do teste hidráulico.

Nesse sentido, a modelagem computacional, a partir da definição de um modelo axissimétrico e dos parâmetros definidos — solo e carregamento —, foi simulada considerando cada estágio de carga do teste hidráulico para 25%, 50%, 75% e para 100% da capacidade do reservatório, conforme a Tabela 1. Para avaliar os resultados dos recalques considerando os carregamentos descritos previamente, imaginou-se, em um primeiro momento, dois cenários possíveis: (i) carregamento integralmente transferido para o anel da fundação, considerando a resultante atuando no perímetro do tanque; (ii) carregamento distribuído ao longo do aterro e no perímetro do anel. Assim, foram avaliadas as condições de transferência de cargas do tanque para o aterro e o anel, considerando tanto um modelo elástico linear, quanto modelo elástico perfeitamente plástico (Mohr-Coulomb). Em vista disso, a simulação foi realizada inserindo os estágios de carga em cada etapa de enchimento, consequentemente, resultando em 5 fases de carregamento (peso próprio + enchimento).

Tabela 1. Carregamentos considerados nas análises

Cenário	Carregamento	Carga Total (kN)	Carga Linear (kN/m)*	Carga Distribuída (kN/m²)**
1	Peso Próprio	1006,9	14,0	-
2	25% de Vol	15074,5	223,52	36,6
3	50% de Vol	30148,9	433,06	73,2
4	75% de Vol	45223,4	642,59	109,8
5	100% de Vol	60297,9	852,13	146,4

\*Considerando o cenário (i)

\*\*Considerando o cenário (ii)

Os parâmetros geotécnicos e elásticos foram estimados a partir de uma sondagem tipo SPT - Standard Penetration Test, que a partir das correlações apresentadas em Texeira e Godoy (1996) forneceram valores para o peso específico do solo, o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade, a coesão e o ângulo de atrito, que são apresentados a seguir.

Tabela 2. Parâmetros estimados empregados no modelo

	$\gamma$ (kN/m³)	$\gamma_{sat}$ (kN/m³)	$\nu$ (Poisson)	E (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Aterro	18	18	0.3	10.000	10	30
Camada 1	18	19	0.3	20.300	10	30
Camada 2	19	20	0.3	42.000	15	35
Camada 3	19	20	0.4	84.792	75	30
Camada 4	19	20	0.3	101.250	50	35
Impenetrável	20	20	0.3	132.000	100	40

Considerando as características do problema em questão, e observando as recomendações de problemas similares apresentados no manual do *Plaxis2D* (Bentley, 2021), tanto em relação aos aspectos de interface, quanto ao contorno, o modelo axissimétrico foi empregado adotando as seguintes condições de contorno: normalmente apoiado no eixo X (*normally fixed*), engastado na base (*fully fixed*), e livre no topo (*free*). Em decorrência disso, na Figura 3 encontra-se a geometria do modelo, bem como com o resultado da campanha de investigação pela sondagem de simples reconhecimento à percussão.

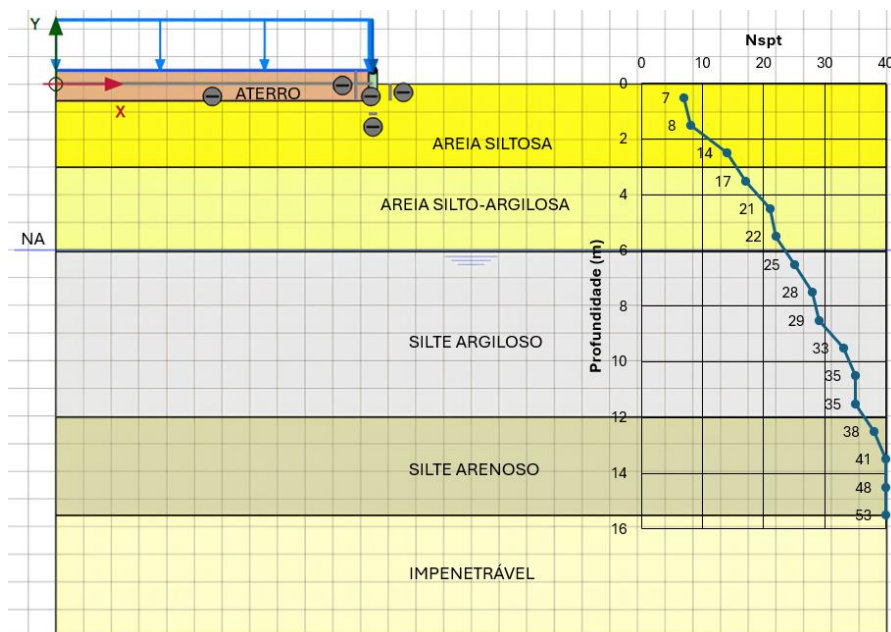


Figura 3. Estratigrafia do modelo.



### 3 RESULTADOS DAS ANÁLISES

#### 3.1 Linear Elástica

Em relação ao modelo linear elástico, a partir dos parâmetros geotécnicos pré determinados, o valor de recalque máximo obtido para o cenário (i), considerando o topo do anel — onde instalou-se o pino de recalque —, foi de 70,29 mm, aproximadamente 50% inferior em relação a média do que foi obtido nas leituras em campo. Já na avaliação do cenário (ii), considerando os mesmos parâmetros da avaliação anterior e diferindo-se apenas a configuração do carregamento adotado, observou-se um recalque de 18,34 mm. Tal valor se distancia do resultado obtido pelo monitoramento em campo, sendo apenas 12% da média em relação ao valor real. Os resultados estimados encontram-se apresentados na Figura 4. É necessário ressaltar que as deformações estimadas no centro do tanque não possuem valores comparativos, visto que os pinos foram instalados ao longo do perímetro.

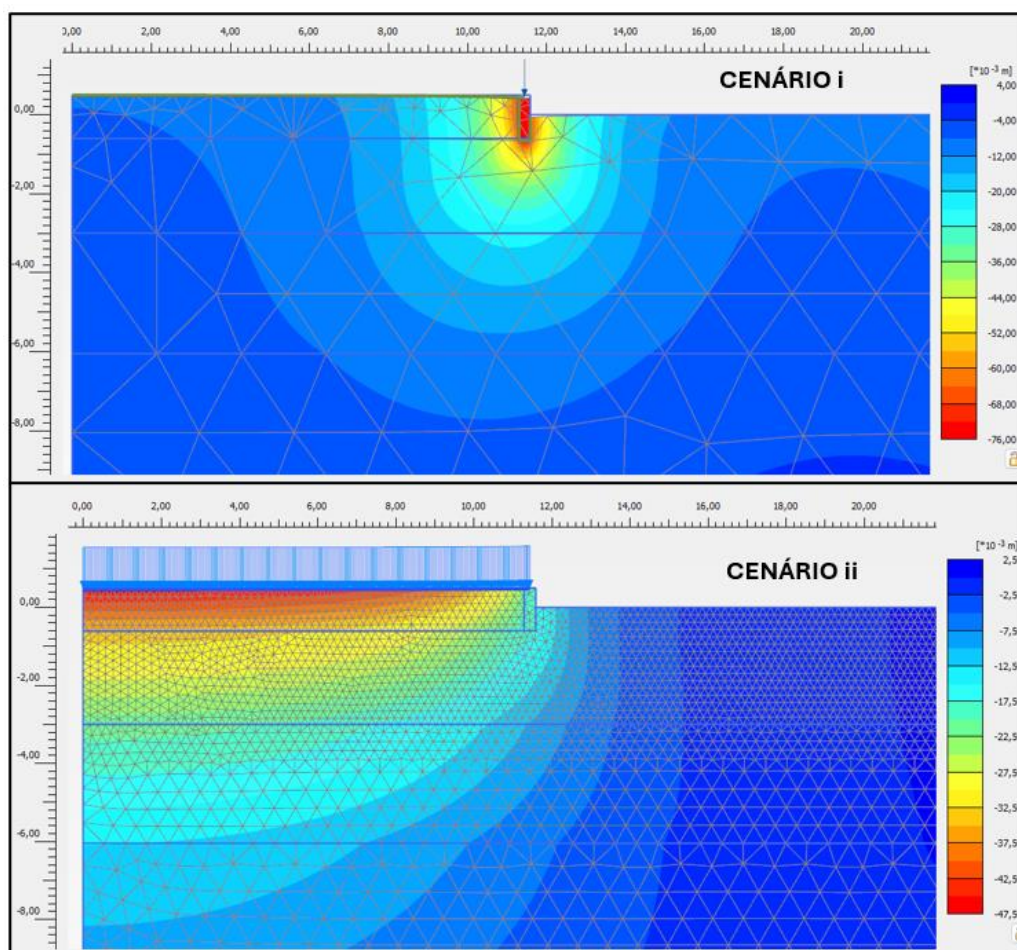


Figura 4. Resultados considerando modelo linear elástico.

#### 3.2 Análise Elastoplástica

A simulação no modelo elastoplástico Mohr-Coulomb, considerando os parâmetros e a configuração apresentadas no item 2, não foi possível de ser realizada para o cenário (i). Foi verificado uma falha numérica no modelo, que infelizmente, considerando o prazo da licença fornecido para o uso da ferramenta, não foi possível investigar em tempo hábil. Todavia, em paralelo, para a simulação do cenário (ii), com carregamento distribuído ao longo da base do tanque, com exceção do peso próprio que se restringiu ao perímetro do anel, verificou-se um recalque de 23,72 mm, equivalente a 15% do valor real medido em campo.

A fim de considerar o carregamento distribuído linearmente no anel, assim como feito nas análises elásticas, onde nessa hipótese observou-se maior magnitude dos recalques no anel, buscou-se dividir as parcelas de carregamento de tal maneira que uma parte majoritária seja suportada pelo anel circular, e o restante pela placa sobre o tanque, de forma a ser possível realizar a modelagem sem a ocorrência de erros numéricos.

Neste sentido, após estimativas prévias chegou-se à seguinte divisão dos carregamentos: 60% sendo suportado pelo anel, e o restante pelo fundo do tanque sobre o aterro, e neste cenário (iii), o valor de recalque obtido a partir da simulação foi de 143,72 mm, cerca de 95% do valor médio medido em campo. A Figura 5 apresenta as deformações analisadas pelo software considerando as novas distribuições de carregamento admitidas.

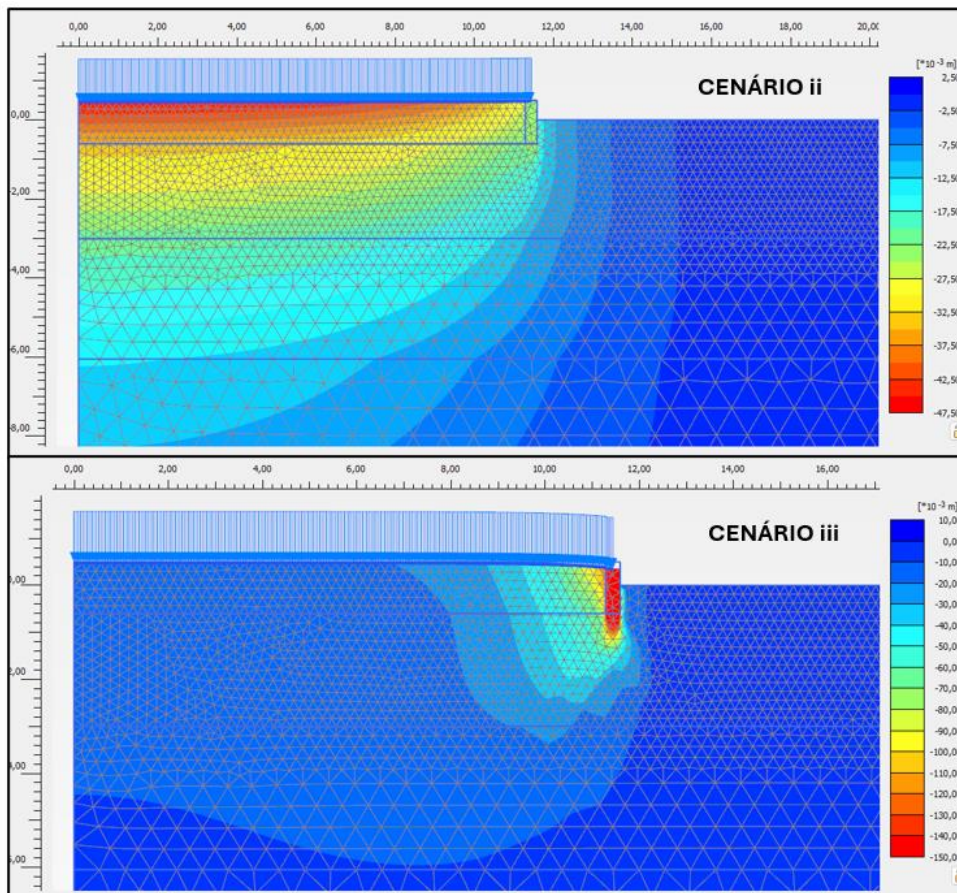


Figura 5. Resultados considerando modelo elastoplástico.

### 3.3 Soluções Fechadas

Para o cenário (i), no qual admitiu-se que o carregamento é distribuído linearmente e exclusivamente sobre o perímetro do anel, foi aplicada a solução apresentada por Azevedo (2015), que permite estimar o acréscimo de tensões e as deformações ocorridas no centro do carregamento. Embora as deformações obtidas em campo, através dos pinos, sejam em posições diferentes das apresentadas na solução analítica, elas possibilitam uma boa aproximação em termos comparativos para a análise, fornecendo uma ordem de grandeza de deformações esperadas. Neste sentido, o valor de recalque encontrado no centro do carregamento foi de 300,90 mm, o dobro do resultado verificado em campo na região da extremidade da estrutura. Considerando a magnitude dos carregamentos e as características da estrutura, recalques maiores são esperados no centro do carregamento. Tal valor é condizente com a expectativa em relação ao estudo de caso, tendo em vista as deformações observadas no bordo.

Por sua vez, em relação à hipótese II, com o carregamento distribuído na área de projeção da estrutura, foi empregada a solução de Love aplicando as considerações de Ahlvin e Ulery (1962), para fazer a avaliação a bordo da região carregada. Assim, o valor do recalque obtido foi de 18,58 mm, cerca de 12% do valor medido a partir do monitoramento do teste hidráulico, mas próximo ao obtido na avaliação com o modelo linear elástico, onde foi encontrado o valor máximo de 18,38 mm.

### 3.4 Discussão dos resultados

A partir dos resultados obtidos das avaliações empregando os modelos linear elástico e elastoplástico, bem como os cenários descritos, assim como as análises realizadas através de soluções fechadas, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 6 a critério de comparação, em conjunto com a média dos valores obtidos no teste hidráulico realizado em campo. Os modelos elásticos em geral apresentaram deformações excepcionalmente baixas em relação aos resultados medidos em campos, e aos estimados com o modelo elastoplástico, o que está associada a plastificação que não é observada no primeiro caso, não havendo condição de rotura para o material. Além disso, observa-se que a consideração do carregamento se distribuindo integralmente, ou majoritariamente, no anel de fundação foi a que mais se aproximou do valor medido em campo. Em específico a simulação do modelo elastoplástico, adotando 60% da carga total agindo no anel, e a parcela restante distribuída sobre área da base do tanque, cenário (iii), com deformação verificada sendo equivalente a 95% das medidas realizadas em campo, sendo 143,72 mm o valor simulado, e 150 mm o valor médio medido.

Nesse sentido, acredita-se que tal desempenho esteja relacionado à má compactação do aterro da base do reservatório, favorecendo uma possível diferença na rigidez dos elementos constituintes da fundação da estrutura, proporcionando um maior carregamento para o anel circular. Essa hipótese também é reforçada quando se observa a deformação obtida a partir da solução fechada considerando um carregamento linear circular na região do anel, na qual a deformação verificada no centro do carregamento, região onde espera-se maiores recalques, apresentou magnitude semelhante à observada na borda estrutura.

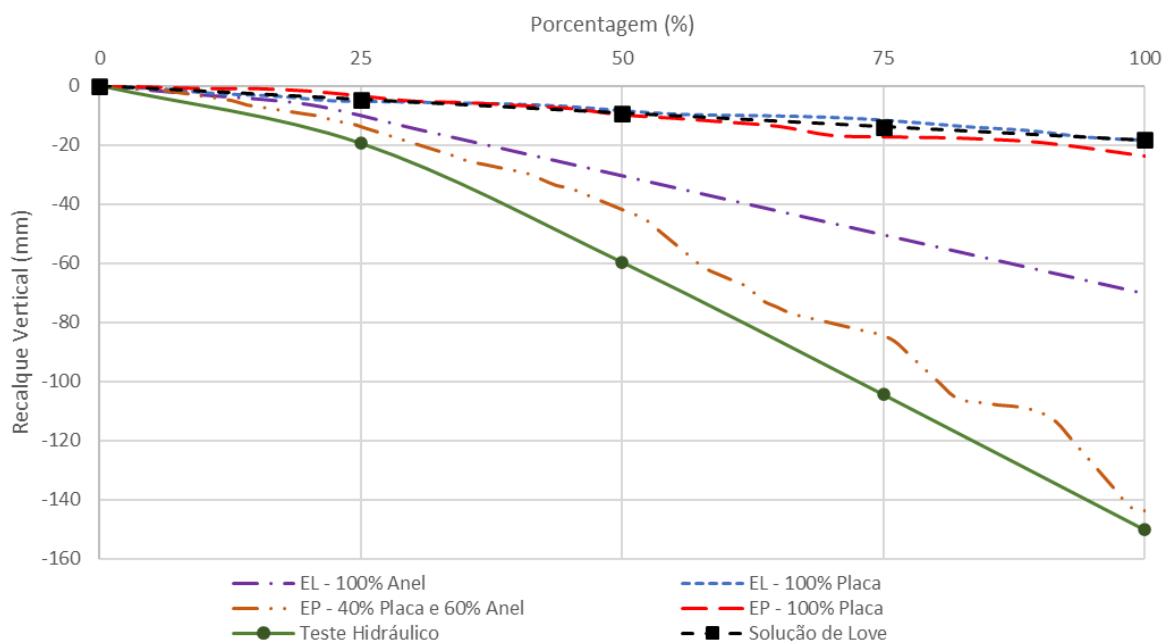


Figura 6. Resumo das análises em conjunto com a média dos dados obtidos em campo.



## 4 CONCLUSÕES

As avaliações empregando a ferramenta numérica permitiu refletir o comportamento observado em campo a partir das hipóteses adotadas, considerando a interpretação dos resultados de medição, bem como o comparativo com as soluções fechadas. Assim, se verificou que as análises numéricas são procedimentos que exigem uma interação entre os resultados simulados teóricos e os valores medidos através do monitoramento de campo a fim de se conseguir previsões mais assertivas, e que refletem um comportamento mais próximo de uma situação real. Além disso, o modelo constitutivo a ser considerado na avaliação tem impacto primordial na análise, não apenas no aspecto qualitativo dos resultados, mas também na complexidade das simulações a serem desenvolvidas. Assim, embora em geral o modelo elástico linear tenha apresentado valores menores ao observado no modelo elastoplástico, os resultados indicaram qual cenário adotar ao se realizar um estudo considerando o modelo Mohr-Coulomb.

No entanto, se fazem necessárias análises mais refinadas para o problema em questão, não apenas em relação aos aspectos de malha envolvendo a modelagem, mas também de ensaios complementares que subsidiem os parâmetros a serem empregados nas análises. Assim, se propõem como trabalho futuro o prosseguimento da pesquisa considerando um modelo constitutivo mais refinado que leve em consideração o efeito da tensão confinante em relação aos parâmetros de deformação e resistência, como *Hardening Soil Model*, além ensaios mais aprimorados que possibilitem a avaliação mais acurada, e possibilite a realização de um estudo paramétrico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahlvin, R. G., Ulery H. H. (1962) Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflection beneath a uniform circular load on a homogeneous half space. In: 41 Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington DC, USA. *Anais Highway Research Board*. v. 1, p. 1-13.
- Azevedo, I. C. D. (2015) *Análise de tensões e deformações em solos*. 2ª ed., Editora UFV, Viçosa, MG. 323p.
- Bentley. (2021) *Plaxis: Material models manual*, Connect Edition, v. 21.01, 274p.
- Gunerathne, S., Seo, H., Lawson, W. D., Jayawickrama, P. W. (2018) Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil. *Computers And Geotechnics*, v. 102, p. 136-147, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.05.008>
- Pinto, C. S. (2006) *Curso básico de mecânica dos solos*. 2ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP. 367p.
- Poulos, H., Davis, E. (1973) *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. 1ª ed., John Wiley & Sons Inc, 424p.
- Teixeira, A. H. e Godoy, N. S. (1996) Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: Hachich, W. et al. *Fundações: teoria e prática*, 3ª ed., Pini, São Paulo. cap. 9, p. 225-262.