

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/156

Análise de Estabilidade e de Fundação de Solo Reforçado com Geogrelhas e Face Metálica

Paulo Cesar Belesso Ferretti

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, p.ferretti@maccaferri.com

Petrucio Santos Junior

Universidade Padre Anchieta/Maccaferri do Brasil, Jundiaí Brasil, p.santos@maccaferri.com

Paulo José Rocha Albuquerque

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: Estruturas de contenção em solo reforçado se tornaram comum em obras de engenharia, em geral possuem fundação do tipo direta. Nesse aspecto as etapas de projeto devem avaliar em suas análises de estabilidade os Fatores de Segurança (FS) das análises internas e externas, bem como a avaliação das tensões resistentes ao solo de fundação, permitindo verificar a compatibilidade entre fundação e solo de apoio, e eventuais recalques. Esse trabalho avalia as análises de estabilidade e de fundação de uma estrutura de contenção em solo reforçado que foi projetada para suportar a carga de um guindaste de 7.500 kN, para execução da cobertura do estádio da Arena Corinthians em São Paulo. As análises foram feitas por softwares de equilíbrio limite (rígido plásticos) e numéricos (elementos finitos – MEF), a fim de avaliar se as considerações de tensão entre as análises são semelhantes. Os resultados quando comparados as células de pressão mostram a compatibilidade do comportamento da fundação, bem como os valores de tensões induzidas quando analisada pelos dois diferentes métodos de análise.

PALAVRAS-CHAVE: solo reforçado, capacidade de suporte, fundação, análise de estabilidade.

ABSTRACT: Reinforced soil retention structures have become common in engineering works; generally, they have shallow foundations. In this aspect, the design stages must evaluate in their stability analyses the Factors of Safety (FS) of internal and external analyses, as well as the evaluation of the soil bearing capacities of the foundation, allowing the verification of compatibility between foundation and supporting soil, and potential settlements. This work evaluates the stability and foundation analyses of a reinforced soil retention structure designed to withstand the load of a 7,500 kN crane for the construction of the roof of the Arena Corinthians stadium in São Paulo. The analyses were performed using limit equilibrium software (rigid-plastic) and numerical methods (finite element method - FEM), in order to assess whether stress considerations between the analyses are similar. The results, when compared with pressure cells, show the compatibility of foundation behavior, as well as the induced stress values when analyzed by the two different analysis methods.

KEYWORDS: reinforced soil, bearing capacity, foundation, stability analyses

INTRODUÇÃO

Os geossintéticos têm se destacado como uma solução eficaz e econômica para estabilização e verticalização de aterros em obras de engenharia civil, especialmente na infraestrutura. Esses materiais têm sido cada vez mais utilizados devido ao desenvolvimento de novos polímeros e à crescente compreensão de seu comportamento. Eles desempenham um papel crucial no reforço do solo, controlando deformações e melhorando o desempenho das estruturas em uso.

Durante as últimas décadas, houve avanços significativos na compreensão do comportamento das estruturas de solo reforçado e nas aplicações dos geossintéticos para melhorar o desempenho das fundações superficiais. Pesquisas extensivas foram realizadas empregando modelos de diferentes escalas, para avaliar o desempenho das fundações reforçadas e desenvolver abordagens de projeto baseadas em princípios racionais.

Além disso, diversos métodos de projeto foram desenvolvidos para avaliar a estabilidade de estruturas de solo reforçado que utilizam geossintéticos. A escolha do método mais apropriado depende da compreensão

das vantagens e limitações dessas técnicas pelo projetista. A análise de equilíbrio limite é comumente empregada na concepção desses muros, enquanto a análise por elementos finitos permite uma análise detalhada do comportamento da estrutura em diferentes cenários.

No contexto brasileiro, durante o período que antecedeu a Copa do Mundo de 2014, houve uma grande demanda por obras de infraestrutura. A construção da Arena Corinthians em São Paulo foi uma obra significativa desse período que necessitou da solução de ESR. Um dos principais desafios encontrados foi a capacidade do solo de suportar as cargas, especialmente considerando a pré-existência das fundações em estacas pré-moldadas de concreto da superestrutura das arquibancadas, que poderiam sofrer esforços horizontais devido a eventuais deslocamentos da fundação da ESR. Isso exigiu uma avaliação criteriosa e um projeto geotécnico abrangente, além de um sistema de instrumentação para monitorar os níveis de tensão e deslocamentos durante a construção, garantindo que a estabilidade da estrutura não comprometesse o cronograma da obra.

Este estudo avalia o comportamento de uma fundação de ESR, importante devido a características únicas, como flexibilidade moderada e localização desfavorável. A instrumentação da fundação forneceu dados sobre seu comportamento, permitindo a comparação com modelos de cálculo. O objetivo é gerar insights para análises futuras de fundações de muros em solo reforçado, considerando as variações de tensões e deformações ao longo da base da estrutura.

2 MÉTODOS DE CÁLCULO PRA FUNDAÇÃO EM ESR

Atualmente, os métodos mais comuns para análise da fundação de estruturas de solo reforçado são os de Terzaghi e Peck (1943), Meyerhof (1963), Brinch-Hansen (1961) e Vesic (1975). Eles se concentram na avaliação da capacidade de suporte do solo, considerando principalmente suas propriedades de resistência ao cisalhamento e compressibilidade.

O método de Terzaghi é usado na engenharia geotécnica para análise de estabilidade de taludes e fundações, considerando propriedades do solo como resistência ao cisalhamento e compressibilidade. Ele enfatiza conceitos como tensão efetiva e total. Um aspecto importante é a avaliação da capacidade de carga do solo, determinada por equações que consideram fatores como coesão e ângulo de atrito interno. Terzaghi propôs uma metodologia para calcular a capacidade de carga de fundações superficiais, com premissas fundamentais que incluem o comprimento do elemento de fundação e a profundidade de assentamento. A representação do processo de ruptura do solo sustentando uma fundação direta inclui três regiões distintas: Região I: uma cunha imediatamente abaixo do elemento de fundação, onde a superfície de ruptura exhibe um trecho reto; Região II: caracterizada pela superfície potencial de ruptura adotar a forma de uma espiral logarítmica e estar sujeita a um estado de tensões passivas de Rankine; Região III: caracterizada pela superfície potencial de ruptura apresentar um trecho reto e pela cunha formada também estar sujeita a um estado de tensões passivas de Rankine. O processo de ruptura no maciço de solo que suporta uma fundação direta é esquematizado na Figura 1.

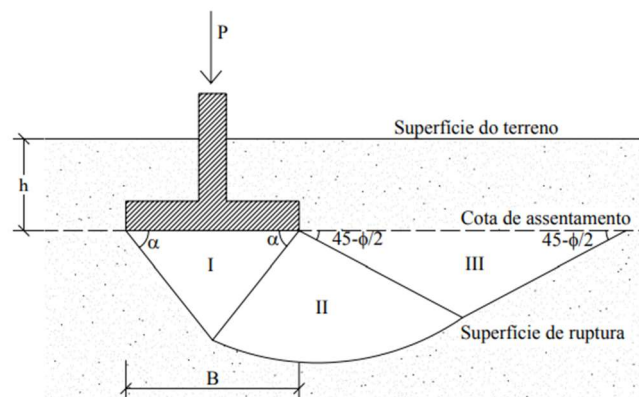


Figura 1: Superfície potencial de ruptura para o maciço de solo submetido à ação de uma fundação superficial.

Em 1951, Meyerhof desenvolveu contribuições relevantes para a capacidade de carga das fundações, alinhadas com os princípios de Terzaghi. Ele destacou a importância do solo acima da cota de assentamento da sapata na sobrecarga e resistência ao cisalhamento. Sua abordagem ampliou o modelo de Terzaghi,

incorporando considerações mais refinadas sobre o solo acima da sapata. Ao examinar os mecanismos de ruptura, Meyerhof considerou as superfícies de deslizamento de forma mais abrangente, reconhecendo a importância da resistência ao cisalhamento nessa camada específica. Essa ampliação do escopo conceitual contribuiu para uma compreensão mais profunda da interação solo-estrutura, conforme a Figura 2 e da distribuição de forças durante a avaliação da capacidade de carga da fundação.

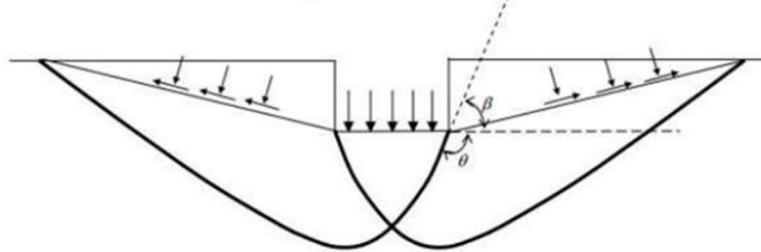


Figura 2: Interação solo-estrutura

3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

A construção de um estádio de futebol inovador exigiu a superação de um desnível de 14 m nos três primeiros níveis de subsolo. A adaptação da estrutura do edifício para resistir aos esforços horizontais do solo foi inicialmente considerada, mas descartada devido a limitações econômicas. Uma segunda opção envolveu uma laje estruturada, porém inviável devido à montagem da cobertura do estádio.

Para permitir o avanço das obras e o içamento das treliças de cobertura, foi prevista a verticalização do aterro do estacionamento em três alas do estádio, com uma estrutura que suportasse os esforços geostáticos e a sobrecarga do guindaste como visto na figura 3. O sistema em combinação com geogrelhas sintéticas foi escolhido devido à sua flexibilidade e capacidade de absorver deslocamentos durante o período construtivo.

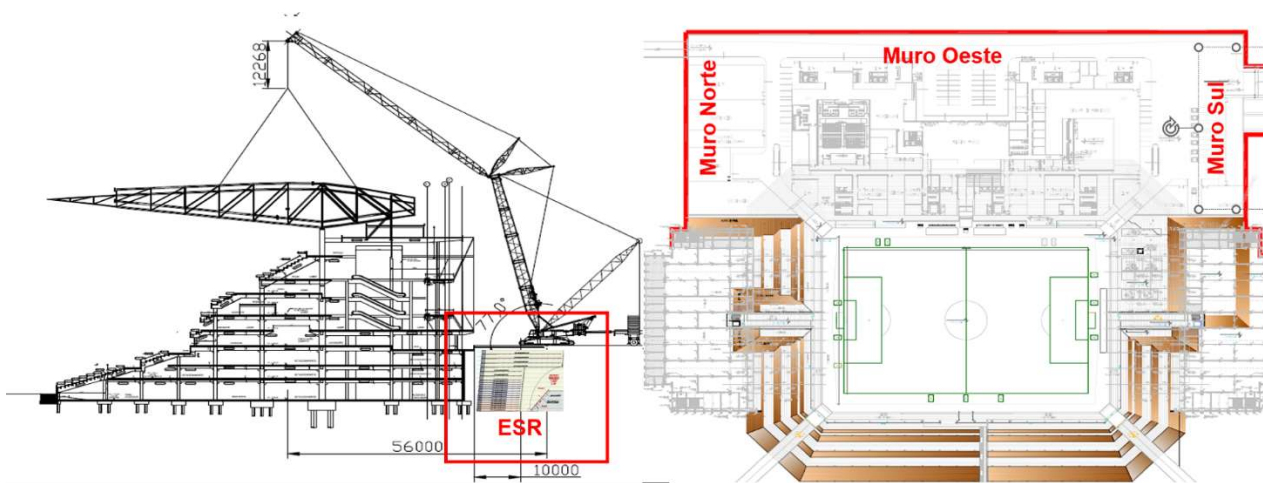


Figura 3: Seção Transversal do estádio com projeção da estrutura e guindaste e planta de localização das ESR.

A solução escolhida foi uma Estrutura de Solo Reforçado (ESR) utilizando o sistema Terramesh Grid, representada pela figura 4, que combina o sistema com geogrelhas. A execução simultânea da estrutura geotécnica com o aterro otimizou prazos e reduziu custos. A escolha de uma fundação direta contribuiu para uma solução robusta. A implementação bem-sucedida do sistema exemplifica uma abordagem integrada e eficaz para atender às demandas do projeto.

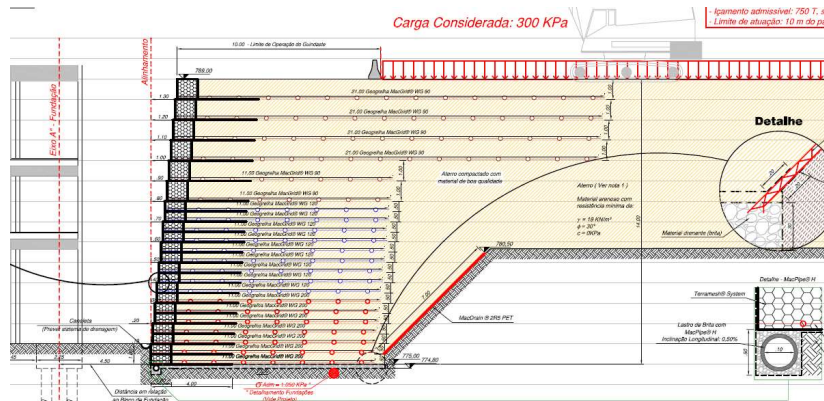


Figura 4: Seção crítica proposta em projeto com a solução Terramesh Grid.

Quanto ao perfil do subsolo, ensaios SPT revelaram que as camadas superficiais do solo consistem em aterros siltosos e argilosos, com baixa resistência, enquanto uma camada mais profunda de silte arenoso demonstrou maior resistência. A análise dos boletins de sondagem forneceu uma compreensão mais detalhada da estratigrafia do solo, destacando a consistência nas propriedades geotécnicas ao longo das profundidades investigadas. A variação nos níveis d'água, conforme figura 5, adicionou complexidade ao ambiente geotécnico, influenciando as condições hidrogeológicas e as propriedades do solo. A interpretação desses dados foi crucial para determinar o tipo de fundação adequado e desenvolver estratégias de controle de água eficazes durante e após a construção. O furo SPT304 revelou uma sequência geotécnica distinta, destacando a importância de uma abordagem adaptativa durante o projeto para garantir a estabilidade e segurança da estrutura. A presença do lençol freático exigirá medidas específicas de drenagem para mitigar possíveis efeitos adversos no comportamento geotécnico do solo.

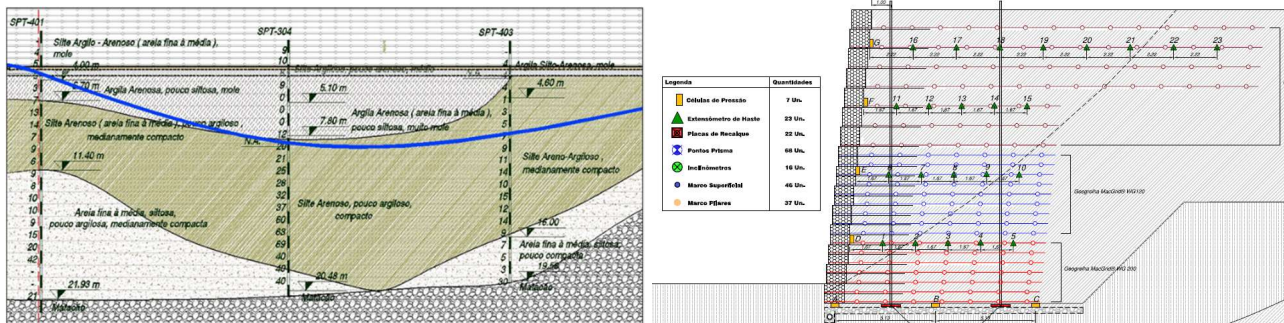


Figura 5: Perfil estratigráfico de acordo com sondagens e seção com instrumentação proposta – Muro Oeste.

Devido à baixa resistência do solo de fundação e ao cronograma apertado que impossibilitava obras de reforço, foi proposto um projeto de instrumentação para monitorar os níveis de tensão e deformação da estrutura. Isso ajudaria a avaliar o comportamento da estrutura, incluindo recalques diferenciais, deformações de face e esforços horizontais nas estacas do prédio e na fundação.

A área crítica identificada nas sondagens corresponde à seção mais crítica ao longo do muro Oeste, onde foram instalados inclinômetros e marcos superficiais. As leituras dos instrumentos ao longo da base da estrutura e junto à face interna dos elementos Terramesh foram feitas para monitorar os níveis de tensão. O inclinômetro, composto por uma haste cilíndrica com sensor de inclinação, foi inserido em um tubo fixado no solo para medir a inclinação e obter o deslocamento do tubo.

Além da instrumentação proposta, foram instalados marcos na cabeça do muro e nas localidades dos pilares da fundação para monitorar qualquer interferência do solo nos elementos da edificação. Os marcos registraram o comportamento do recalque da estrutura em solo reforçado até dezembro de 2013, destacando situações críticas de deformações verticais.

4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DE FUNDAÇÕES

Na realização das análises transversais das estabilidades internas da seção crítica do muro Oeste com $h=14,0$ m e externas com o software MacStars 2000 que aplica o método de equilíbrio limite bidimensional e critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Terzaghi e Peck, 1987). Foram realizadas verificações de rupturas internas, globais por Jambu e de capacidade última de fundação por Meyerhof a fim de definir os FS para o equilíbrio de forças.

Na Figura 6 é possível observar as análises de estabilidade interna e global, com cunhas de rupturas circulares mediante modelagem no software .

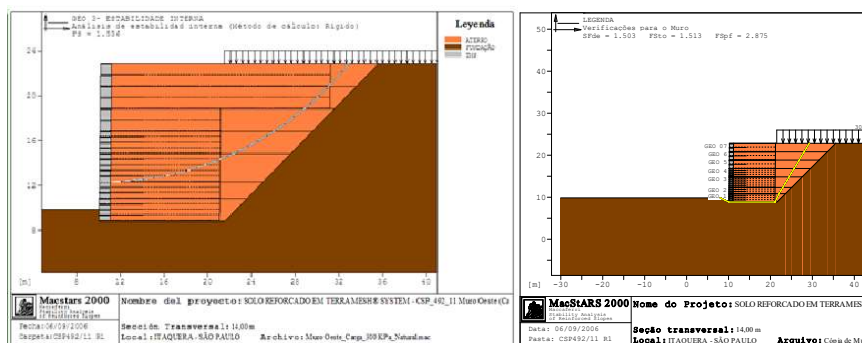


Figura 6: Análise de estabilidade interna e externa da ESR.

Na tabela 1 se encontram os FS das verificações de estabilidade para a estrutura de contenção pelo método de equilíbrio limite

Tabela 1: Verificações de estabilidade para a contenção pelo método do equilíbrio limite.

Tipo de análise	Fator de segurança
Estabilidade Interna (mínimo valor considerado)	1.50
Estabilidade Global	1.25
Capacidade de suporte da fundação	2.87
Escorregamento	1.50
Tombamento	1.51

As análises de estabilidade como muro, englobaram os FS contra o deslizamento, tombamento e capacidade de carga da fundação. Esta ultima analise apresentou um FS de 2,87 (Figura 6), fator esse que acaba por não atender aos critérios de fundações rasas da NBR 6122 que estabelece FS mín. de 3,0 para métodos analíticos, fazendo-se então a necessidade de avaliação de tensão x deformação da estrutura e sua fundação.

A tabela 2, mostram os valores de pressão disponível na fundação, e tensão máxima de fundação pelo método de Meyerhof (1963), para obtenção do FS. Também apresentam os esforços máximos para obtenção dos FS contra o tombamento e deslizamento.

Tabela 2: Dados da verificação como muro a gravidade

Verificação fundação	Valor	Unidade
Pressão disponível na Fundação	2518	kN/m ²
Força Horizontal Máxima	1653	kN/m
Fator de Segurança contra Deslizamento	1,503	-
Momento Máx de tombamento	10763	kN.m/m
Fator de segurança contra o tombamento	1,513	-
Tensão Máx na fundação	876	kN/m ²
Fator de Segurança da capacidade de carga	2,875	-

Para uma análise mais completa dos níveis de tensão e deformação do solo de fundação bem como do comportamento estrutural da estrutura de contenção, foram propostos modelos numéricos através da utilização do software PLAXIS, permitindo uma análise detalhada do comportamento mecânico estrutural da ESR, resultando na identificação dos deslocamentos para analisar o incremento do carregamento geostático durante a fase construtiva e para se analisar o comportamento do solo de fundação durante o tráfego de guindaste de 7.500kN, que promovia uma sobrecarga 300kPa na área de trafego e patolagem do aterro (figura 7).

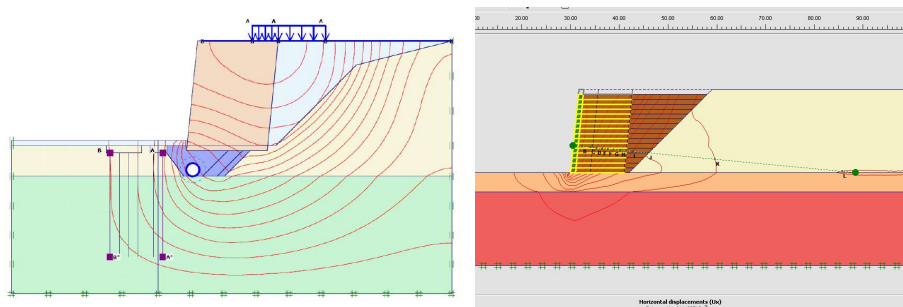


Figura 7: Modelagem da estrutura com e sem o efeito da sobrecarga para avaliação dos deslocamentos horizontais.

As análises foram modeladas de acordo com parâmetros geotécnicos resultados de ensaios de laboratório como cisalhamento direto, triaxial e ensaio oedométrico do solo de fundação, além de avaliação e aferição das sondagens a percussão tipo SPT e seguiram os parâmetros definidos na Tabela 3:

Tabela 3: Parâmetros de solo usados nas análises numéricas – Critério de Mohr-Coulomb.

Solo	Tipo	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]	Módulo Elástico [MPa]
Aterro	Drenado	28	30	100
Solo natural	Drenado	35	33	500
Solo mole	Não-drenado	10	20	8
Solo de fundação	Não-drenado	15	25	80
Gabião*	Drenado	90	40	5

Através da utilização do software, PLAXIS, foi conduzida uma análise detalhada do comportamento mecânico, resultando na identificação de um deslocamento de 11cm. O emprego do PLAXIS permitiu uma abordagem minuciosa, modelando as interações complexas entre a estrutura, o solo estrutural e solo de fundação (figura 8) do projeto em resposta às cargas aplicadas.

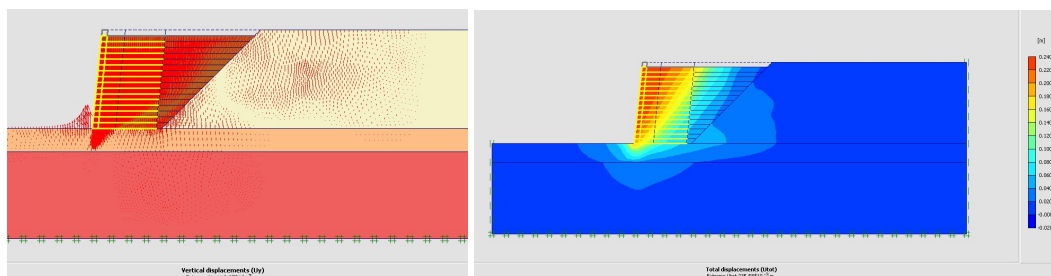


Figura 8: Análise numérica da fundação com recalque previsto de 11cm.

A análise da máxima tensão na fundação, quando realizada pelo método numérico da estrutura de solo reforçado, foi fundamental para determinar os pontos críticos, tensões e deformações na fundação onde as mesmas atingem valores máximos, gerando informações importantes para o projeto e para avaliação das células de pressão instaladas na fundação.

A análise conduzida através do PLAXIS, apresentou um resultado de tensão máxima de 400 kN/m^2 . Esse valor representa a magnitude máxima das tensões simuladas para fundação da estrutura, e sua interpretação é essencial para avaliar a capacidade da fundação em suportar as cargas aplicadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Frente as análises de estabilidade realizadas foi possível uma comparação entre os métodos de cálculo a fim de se comparar e avaliar os níveis de tensões que seriam descarregados na base da estrutura juntamente com a elevada sobrecarga do Guindaste. Os valores das análises com os valores da máxima tensão na fundação, quando realizada pelo método numérico forneceu um valor de 400 kPa , enquanto pelo método de equilíbrio limite um valor de 876 kPa ,

Os resultados apresentados pelas análises de estabilidade e de fundações pelos métodos mencionados, foram analisados e comparados com o resultado das células de pressão dispostas na seção crítica do muro Oeste ao longo de sua base, permitindo as leituras graduais dos incrementos de tensão ao longo do alteamento da estrutura, permitindo a leitura dos incrementos de tensão geostática dentre Abril a Julho, e novas leituras das tensões ao longo da vida útil da contenção em solo reforçado de Julho a Dezembro e posteriormente de Fevereiro a Março, como visto na figura 9.

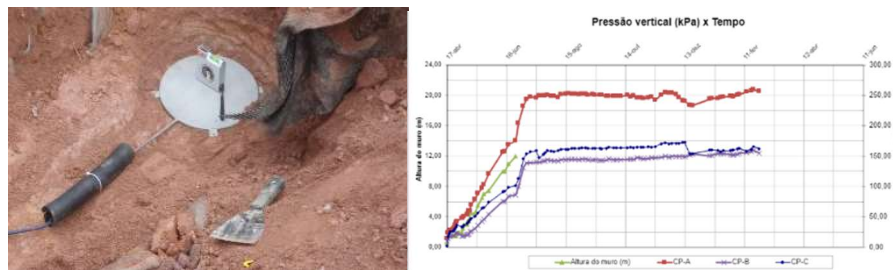


Figura 9: Célula de pressão e leituras feitas ao longo da construção e vida útil da ESR.

Com a leitura das células de pressão ao longo do tempo foi possível traçar o real diagrama de tensões da fundação da ESR, evidenciando os pontos de concentração de tensões mais próximo a face com tendência de uniformização ao longo dos 10 m da base da estrutura, figura 10, Além disso foi possível evidenciar que os níveis de tensões medidas na instrumentação são consideravelmente menores aos que definidos nas análises de estabilidade pelos métodos MEL e MEF.

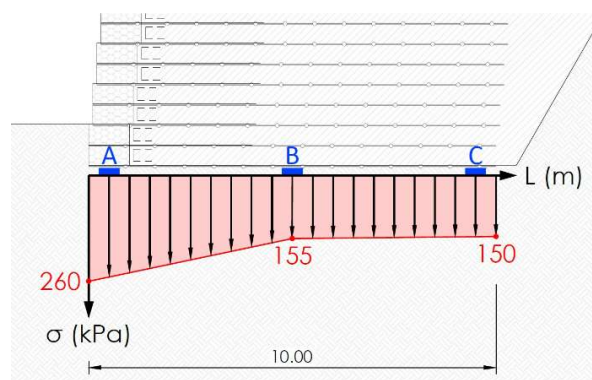


Figura 10: Diagrama de tensões das leituras realizadas pelas células de pressão A, B e C.

Os resultados das leituras das células de pressão ao longo da base da estrutura evidenciam valores muito inferiores aos apresentados nas análises de estabilidade por ambos os métodos.

Os nível de tensões mostram um comportamento muito próximo ao carregamento geostático de alteamento de solo com $h=14 \text{ m}$ com solo altamente compactado, não apresentando quaisquer indícios de incrementos de tensão ou aumento no carregamento da fundação da ESR em função da sobrecarga de 300 kPa gerada pelo guindaste de 7.500 kN .

A análise dos resultados obtidos através dos métodos de equilíbrio limite e numéricos da fundação mostram que os FS e valores de tensão são superestimados frente a comparação com o nível de tensão real medido nas células de pressão.

As distribuições das tensões não se mostram uniformemente distribuídas como na consideração do modelo por equilíbrio limite e se assemelham ao comportamento demonstrado pelas análises numéricas demonstrando grande parte do acúmulo de tensões próximo a face, sendo esta zona de maior plastificação e acúmulo de tensões.

6 CONCLUSÕES

As análises por elementos finitos proporcionaram um entendimento aprofundado do comportamento mecânico de uma estrutura em solo reforçado, especialmente no que diz respeito às zonas de plastificação e aos assentamentos da fundação, como recalques verticais e deslocamentos horizontais.

Uma parte do solo de fundação ao longo do comprimento do muro apresentou uma capacidade de suporte relativamente baixa. No entanto, esperava-se que, por meio do processo de compactação do material de aterro estrutural, houvesse uma melhoria na resistência do solo, permitindo que a estrutura em solo reforçado absorvesse as deformações provenientes do solo de fundação. É importante ressaltar que ainda havia incerteza quanto ao comportamento combinado do solo reforçado e do solo de fundação, especialmente diante do impacto significativo da carga imposta pelo guindaste.

Ao analisar os resultados obtidos pelas leituras das células de pressão da fundação, observou-se tensões inferiores às definidas pelas análises realizadas na fase de projeto, indicando que, em situações semelhantes, as estruturas em solo reforçado de grande altura distribuem internamente as cargas, transmitindo baixos níveis de tensão ao solo de fundação.

As análises realizadas na fase de projeto, relacionadas à estabilidade e capacidade de suporte da fundação, devem, sempre que possível, ser conduzidas por meio de ambos os métodos de equilíbrio limite e elementos finitos, de forma a complementar-se mutuamente. A medição e instrumentação de estruturas dessa magnitude representam excelentes ferramentas para os responsáveis pelo projeto, permitindo a medição e o acompanhamento das tensões, deformações e comportamentos para garantir que estejam dentro dos parâmetros previstos no projeto.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASTM International (2006). ASTM D2166: *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*.
- Federal Highway Administration, Washington, DC, 2010.
- MACCAFERRI Spa Italia Terramesh System - Una soluzione per il rafforzamento del territorio – Catálogo Técnico, Bolonha-IT. 1997.
- MEYERHOF, G. G. "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations." *Géotechnique*, v. 2, n. 4, p. 301-331, 1951.
- Meyerhof, G. G. Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 1, n. 1, p. 16-26, 1963.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- Silva, J. L. (2004) *Metodologia de projeto de fundações por estacas incluindo probabilidade de ruína*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 118 p.