

Análise dos Esforços Solicitantes nas Fundações de Edificação Comercial Erigida em Crista de Talude de Aterro Compactado.

Thiago Cruz Bretas

Sergio Velloso Projetos Ltda, Belo Horizonte/MG, Brasil, thiago@sergiovelloso.com.br

Sergio Maurício Pimenta Velloso Filho

Sergio Velloso Projetos Ltda, Belo Horizonte/MG, Brasil, spvelloso@sergiovelloso.com.br

RESUMO: A implantação de edificações comerciais (galpões) em aterros compactados controlados constitui-se prática comum na engenharia. Atenção especial, porém, deverá ser dada às fundações que deverão ser projetadas com critério para atravessar a camada de aterro e serem apoiadas em solo residual com resistência compatível com as cargas provenientes da estrutura. Quando a laje de piso do galpão encontra-se apoiada sobre o terreno, as tensões são aplicadas diretamente sobre o solo de apoio (no caso, no maciço de aterro). Tais acréscimos de tensões geram recalques verticais muitas vezes previstos, que podem não afetar nem a estabilidade da estrutura nem de suas fundações. Porém, quando a edificação é erigida próxima à crista de um talude de aterro, além dos recalques verticais, são verificadas também deformações horizontais que podem prejudicar a integridade do conjunto fundação/estrutura. O trabalho ora apresentado visa demonstrar, através de estudo de caso, a importância da análise de deformações verticais e horizontais em edificação de estrutura em concreto pré-fabricado, implantada próxima à crista de um aterro compactado controlado. Monitorados através de inclinômetros, os taludes de aterro apresentaram deformações horizontais que pouco interferem na sua estabilidade (quanto a escorregamentos) mas que podem não ser facilmente absorvidas por estruturas desse tipo. A estabilidade estrutural e geotécnica dos elementos de fundação foi comprovada após verificação dos esforços normais, de cisalhamento e de flexão derivados das deformações horizontais do maciço de aterro. Fica claro que mesmo analisando-se um talude somente pelos métodos consagrados por equilíbrio-limite e atingindo os fatores de segurança preconizados por norma, as deformações ocorridas no maciço ainda podem ocasionar danos à estrutura. Assim sendo, este trabalho ressalta a importância da realização de análises de tensões e deformações do maciço para que se tomem medidas preventivas para a plena utilização da edificação, em conjunto com as estabilidades globais dos taludes por equilíbrio-limite.

PALAVRAS-CHAVE: inclinômetros, deformações, recalques, fundações, aterro.

1 INTRODUÇÃO

A implantação de edificações em aterros controlados constitui prática comum na engenharia nos dias atuais. Cada dia mais, grandes galpões comerciais são erigidos sobre camadas espessas de aterro controlado compactado. Tal fato não prejudica o desempenho da estrutura desde que alguns cuidados adicionais ou análises específicas sejam realizadas.

O galpão estudado possui cerca de 25m de altura e 27.500m² de área útil, com sobrecarga

de utilização máxima de 100 kPa. Como a laje apóia atualmente diretamente sobre o platô do aterro, diferentemente da concepção original, as tensões são transmitidas diretamente ao maciço.

Sabe-se que aterros jovens são maciços deformáveis, principalmente após aplicação imediata de sobrecargas sobre os mesmos gerando deformações verticais (recalques) e horizontais nas regiões próximas à crista dos taludes.

Um dos aspectos mais importantes a serem abordados quanto à segurança de tais edificações são as fundações, que deverão ser

profundas suficientes para atravessarem totalmente a camada de aterro apoiando ou embutindo no terreno residual com resistência compatível para resistir aos esforços aplicados.

Este trabalho tem como objetivo analisar os esforços solicitantes nas fundações de uma edificação erigida sobre aterro compactado (Figuras 1, 2, 3 e 4). As deformações horizontais e verticais do aterro, quando submetido à aplicação da sobrecarga de utilização do galpão, induzem esforços nos tubulões de fundação.

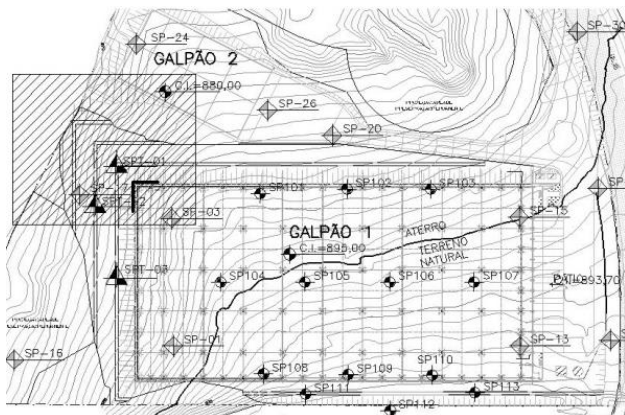


Figura 1. Planta Chave – Localização do Galpão e Trecho analisado (hachura).

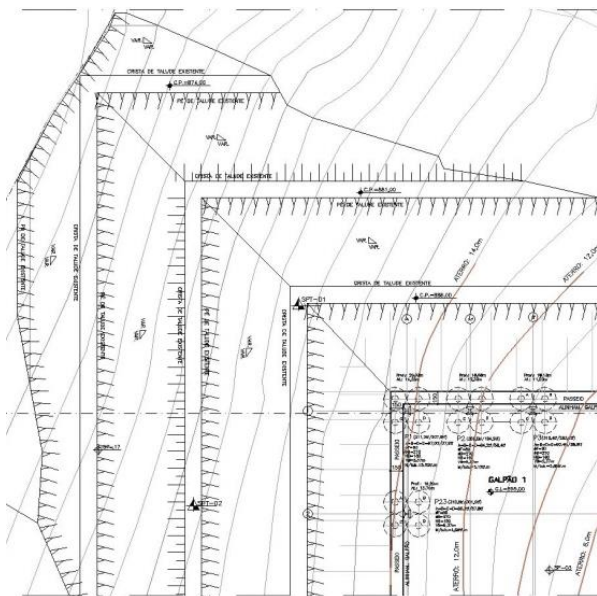


Figura 2. Região analisada – talude mais alto



Figura 3. Vista geral do galpão e do talude de aterro analisado



Figura 4. Vista geral do galpão e do talude de aterro analisado

A seção crítica do talude de aterro possui fator de segurança satisfatório ($FS \geq 1,5$ por equilíbrio-limite) sem aplicação de sobrecarga, quanto à escorregamentos globais, porém as leituras dos inclinômetros de monitoramento instalados evidenciam deformações no maciço e justificam a necessidade de análise dos esforços nas fundações.

As análises foram realizadas através dos softwares Slide (Equilíbrio-limite) e Phase2 (Elementos finitos) ambos da Rocscience, para verificação da estabilidade do maciço de aterro e análises de tensões e deformações nas fundações. Uma seção crítica, talude com maior altura (Figura 5), foi modelada com base na geometria atual e sondagens à percussão executadas antes e depois do aterro compactado.

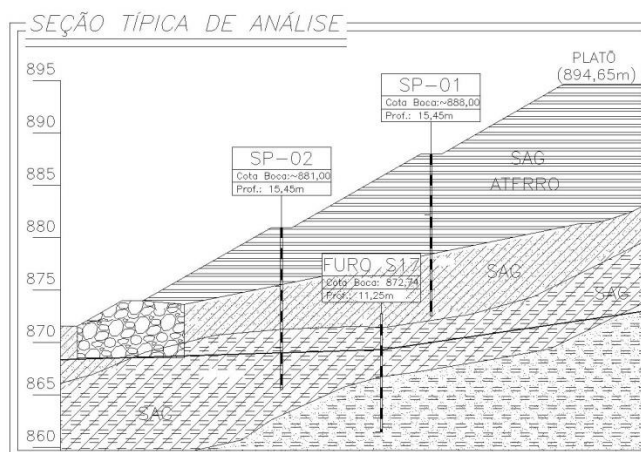


Figura 5. Seção típica de análise.

2 O PROJETO DE FUNDAÇÕES

As fundações projetadas para a edificação foram em tubulões apoiados em solo residual (com $\sigma_{adm} = 400$ kPa). Devido aos grandes vãos entre pilares, aliados aos esforços horizontais e momentos e a impossibilidade de travamento com vigas, foram executados quatro tubulões por pilar, conforme indicado na Figura 6.

Os tubulões foram embutidos em solo residual de resistência compatível com as cargas da estrutura, atravessando totalmente a camada de aterro compactado, totalizando 20,0m de profundidade na região crítica.

O conjunto de quatro tubulões com $\varnothing_{fuste} \geq 80$ cm oferece a rigidez necessária para absorver os esforços com segurança, além de minimizar consideravelmente as deformações do maciço de aterro.

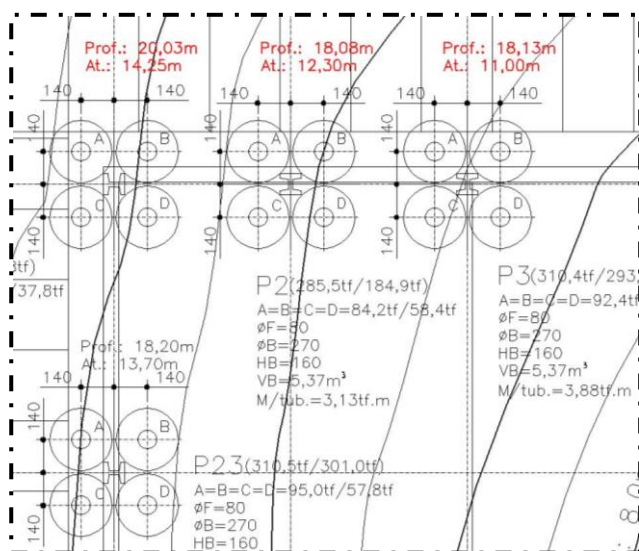


Figura 6. Região analisada – Projeto de Fundações

3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Como “*a priori*”, se dispõe apenas de sondagens à percussão executadas antes e depois da camada de aterro, os parâmetros de solo utilizados nas análises de estabilidade foram retirados de correlações empíricas (Tabela 1).

Conforme Figura 5, a seção geológico-geotécnica típica para a região consiste em camada de aterro argiloso compactado com $N_{spt}=7,6$ (apesar da média de golpes SPT da camada de aterro ser superior a esse valor, foi adotada a pior situação para todos os furos do empreendimento) seguido por camada de silte argiloso de $N_{spt}=15,4$. Abaixo dessa camada, encontra-se solo composto por argila siltosa com $N_{spt}=23$ e por fim camada de silte arenoso de resistência crescente com a profundidade. Para efeito de modelagem numérica nos softwares, essa camada de silte arenoso foi considerada com $N_{spt}=34,2$.

A base do aterro foi executada sobre “trincheira” de rachão devido à presença de água superficial no local. Tal camada portanto, foi também incluída nas análises de estabilidade realizadas.

Tabela 1. Parâmetros de resistência dos solos

	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4	Solo 5
	Aterro	SAG	ARGS	SAR	Rachão
Nspt	7,6	15,4	23,0	34,2	--
γ (kN/m ³)	17,0	19,0	21,0	20,0	23
c (kPa)	9,5	25,7	38,3	57,0	0
ϕ (°)	27,0	32,0	36,0	41,0	45
E (kPa)	13.680	20.300	27.840	56.100	50.000
ν	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4

Foram realizadas diversas análises de estabilidade pelos métodos de equilíbrio-limite e elementos finitos (“*Shear strength reduction*”) em função de diversas sobrecargas de utilização do galpão. A seguir, mostram-se os resultados das análises que pesquisaram superfícies não

circulares de ruptura por serem consideradas as mais críticas (menores fatores de segurança), Tabela 2 e Figuras 7 e 8.

Tabela 2. Análises de estabilidade por equilíbrio-limite

Sobrecarga q (kPa)	Método	FS
10	M. Price	1,45
25	M. Price	1,43
50	M. Price	1,39
75	M. Price	1,34
100	M. Price	1,32

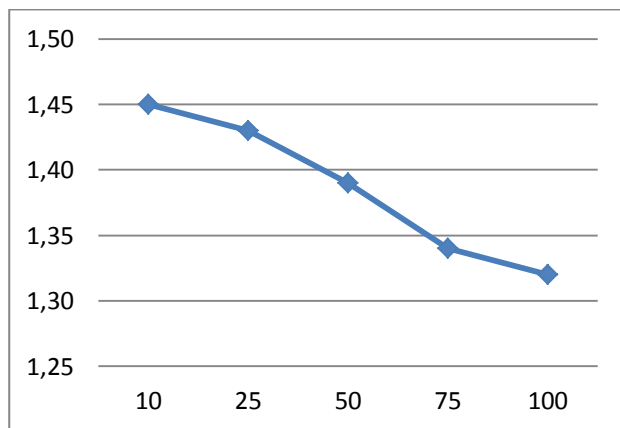


Figura 7. Gráfico Fatores de segurança x Sobrecarga (kPa) – Equilíbrio-limite

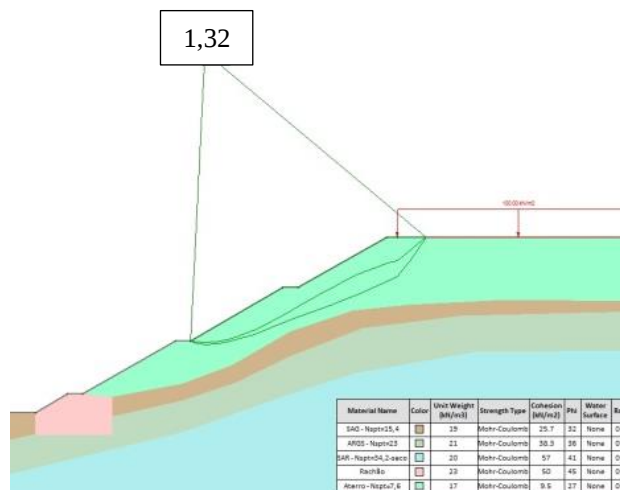


Figura 8. Análise de estabilidade – Equilíbrio-limite – FS=1,32 para q=100kPa

As análises apresentadas na Tabela 3 e Figura 8 foram realizadas pelo método dos elementos finitos no software Phase2 da

Rocscience, através do recurso “*Shear Strength Reduction*” (SSR).

Tabela 3. Análises de estabilidade por elementos finitos

Sobrecarga q (kPa)	Método	FS
10	SSR	1,44
25	SSR	1,42
50	SSR	1,39
75	SSR	1,36
100	SSR	1,33

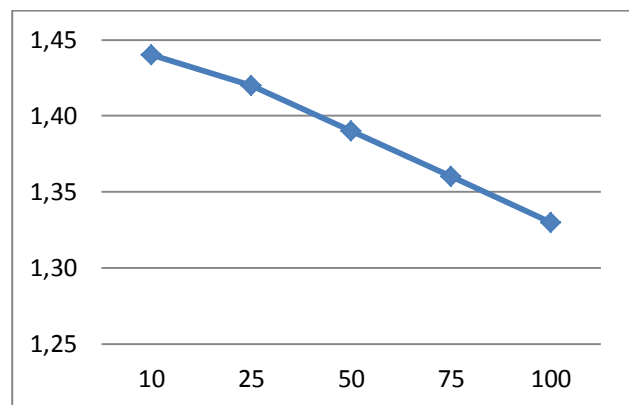


Figura 9. Gráfico Fatores de segurança x Sobrecarga (kPa) – Elementos finitos

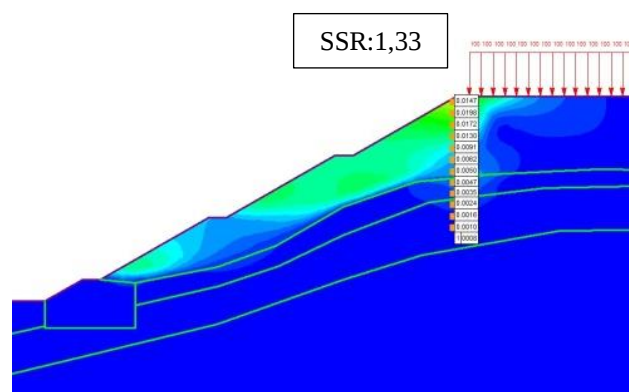


Figura 10. Análise de estabilidade – Elementos finitos – FS=1,33 para q=100kPa

Conforme análises de estabilidade apresentadas acima, o talude de aterro apresenta condição de estabilidade, porém com fator de segurança inferior ao recomendado pela norma ABNT NBR 11.682/09 ($FS \leq 1,5$). Conforme era de se esperar, quanto maior a sobrecarga, menores são os fatores de segurança do talude.

Inserindo-se na seção típica de análise os tubulões de fundação, sendo que cada elemento possui a rigidez de dois tubulões de $\varnothing_{fuste}=80\text{cm}$, totalizando os quatro tubulões por pilar (Figura 9), obtém-se os seguintes resultados:

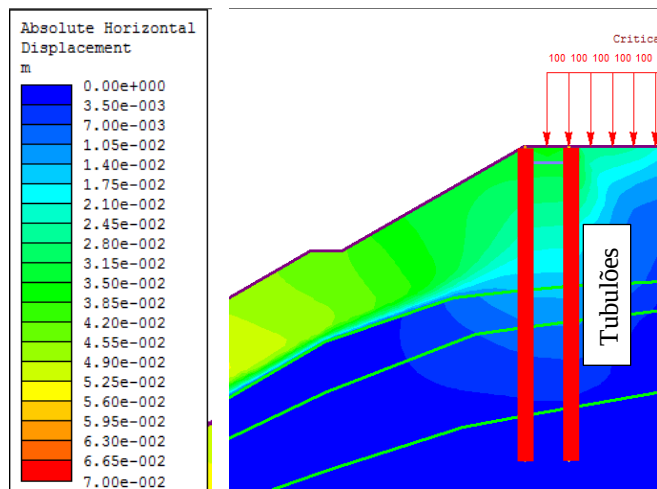


Figura 11. Deformações horizontais nos tubulões de fundação – software Phase2

Tabela 4. Análises de estabilidade por elementos finitos – esforços solicitantes nos elementos de fundação

q (kPa)	Método	FS	Mmáx (kN.m)	Vmáx (kN)	dhmáx (mm)
10	SSR	1,45	139,4	87,3	6,0
25	SSR	1,45	212,2	138,5	8,0
50	SSR	1,45	342,5	231,8	13,0
75	SSR	1,46	439,2	337,0	22,0
100	SSR	1,46	665,1	456,2	35,0

Na Tabela 4 acima são apresentados os esforços solicitantes (momento fletor e esforço cortante) em cada elemento de fundação, com rigidez dobrada, além da deformação horizontal máxima no elemento.

Aferindo-se os resultados acima com os resultados das leituras inclinométricas realizadas no local, assim como o histórico de sobrecargas de utilização do galpão, pode-se concluir que o modelo possui boa confiabilidade.

Tabela 5. Resultados das leituras inclinométricas Deformações horizontais acumuladas (mm)

Leitura	Inclinômetro		
	01	02	03
Calibração 14/10/2014	0,00	0,00	0,00
1ª Leitura 26/01/2015	1,24	6,53	5,71
2ª Leitura 13/03/2015	1,75	8,98	5,72
3ª Leitura 04/05/2015	6,60	13,98	6,36
4ª Leitura 03/07/2015	12,04	18,04	7,27
5ª Leitura 16/09/15	17,15	21,84	10,07
6ª Leitura 22/01/2016	18,93	27,59	14,48

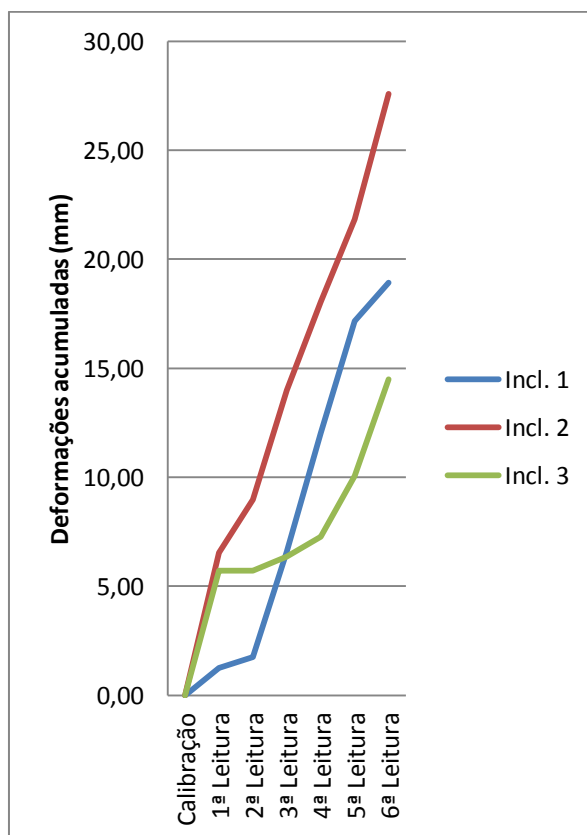


Figura 12. Resultados das leituras inclinométricas Deformações horizontais acumuladas

Tabela 6. Resultados das leituras inclinométricas
Deformações horizontais diárias (mm)

Leitura	Inclinômetro		
	01	02	03
Calibração 14/10/2014	0,00	0,00	0,00
1ª Leitura 26/01/2015	12,20	64,00	56,00
2ª Leitura 13/03/2015	10,90	52,10	0,20
3ª Leitura 04/05/2015	95,10	98,00	12,50
4ª Leitura 03/07/2015	92,20	68,80	15,40
5ª Leitura 16/09/15	67,20	50,00	36,80
6ª Leitura 22/01/2016	14,50	46,70	35,90

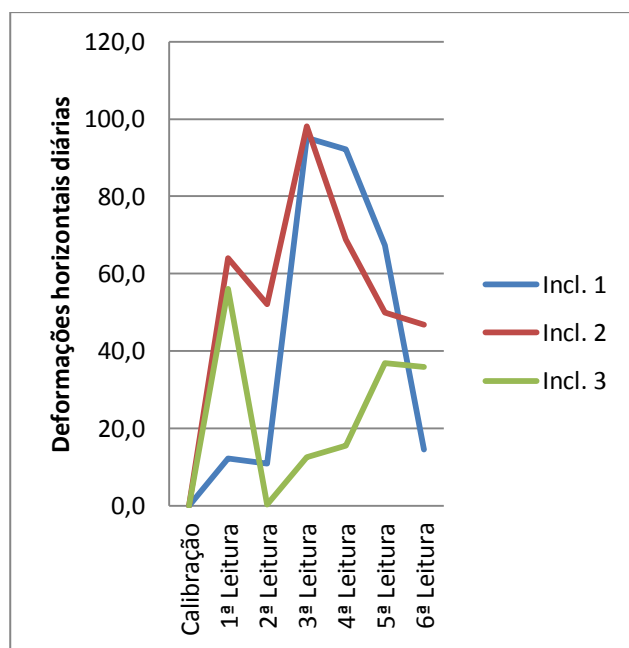


Figura 13. Resultados das leituras inclinométricas
Deformações horizontais diárias

Em visitas realizadas em campo, pôde-se constatar que a sobrecarga existente é da ordem de 75kPa. A deformação acumulada medida no inclinômetro 2, mais próximo da quina do galpão, foi de 27,59mm enquanto que a deformação horizontal estimada pela análise de tensão x deformação foi de 22,0mm. Porém, os gráficos representados nas figuras 12 e 13 ainda

não indicam tendência de estabilização das movimentações, significando que alguma intervenção preventiva pode ser realizada.

Caso o galpão atinja sua capacidade máxima de utilização (100 kPa), os esforços máximos atuantes serão da ordem dos valores apresentados na Figura 4, assim como as deformações horizontais máximas.

4 VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DOS ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO

Tomando-se como referência os esforços e deformações máximas indicados na Figura 4, para sobrecarga de 100kPa, foi realizada uma verificação estrutural dos tubulões de fundação.

Para o esforço de momento fletor, o valor encontrado na análise foi de 665,1 kN.m (Figura 14) para dois tubulões, ou seja, 332,55 kN.m por tubulão. Utilizando-se os ábacos de Montoya de flexo-compressão ($d'=0,10.h$), para carga vertical mínima de 378 kN, a armadura necessária é de 9ø20,0mm, exatamente a mesma prevista no Projeto de Fundações e executada no local.

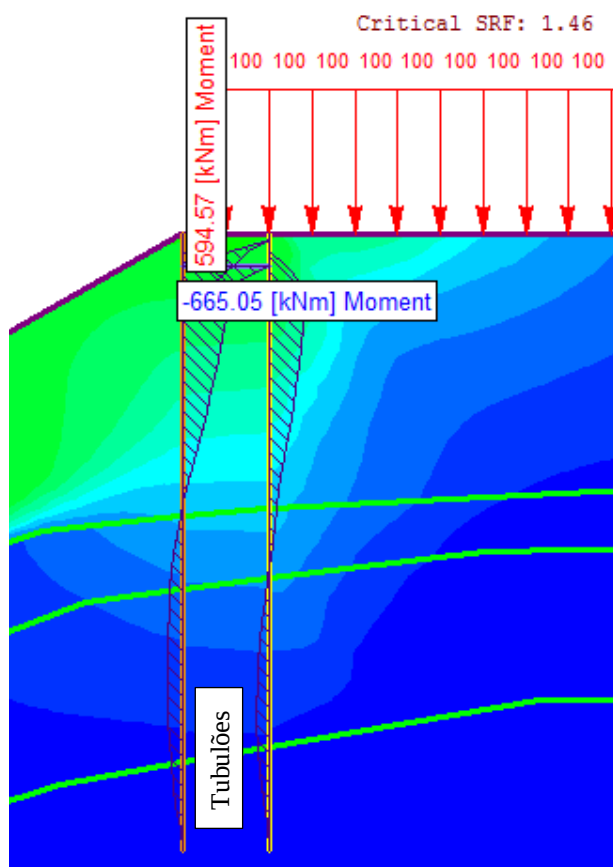


Figura 14. Momento fletor máximo atuante para cada dois tubulões de fundação

Verificando-se também o esforço cortante máximo atuante por tubulão (228,1 kN – Figura 15) conclui-se que os estribos existentes previstos em projeto são suficientes ($\varnothing 8,0\text{mm}$ cada 20 cm).

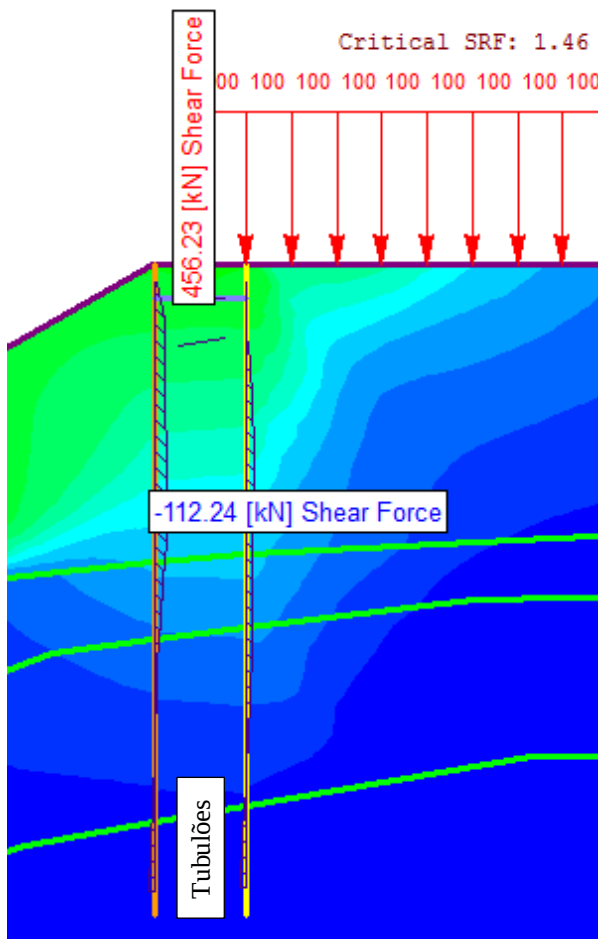


Figura 15. Esforço cortante máximo atuante para cada dois tubulões de fundação

5 MEDIDAS PREVENTIVAS DE REFORÇO

Como as deformações horizontais medidas ainda não demonstram tendência de estabilização, visto o porte do galpão e as tensões atuantes, foi acordada a execução de reforço em tubulões na crista do talude de aterro, conforme Figura 16 abaixo.

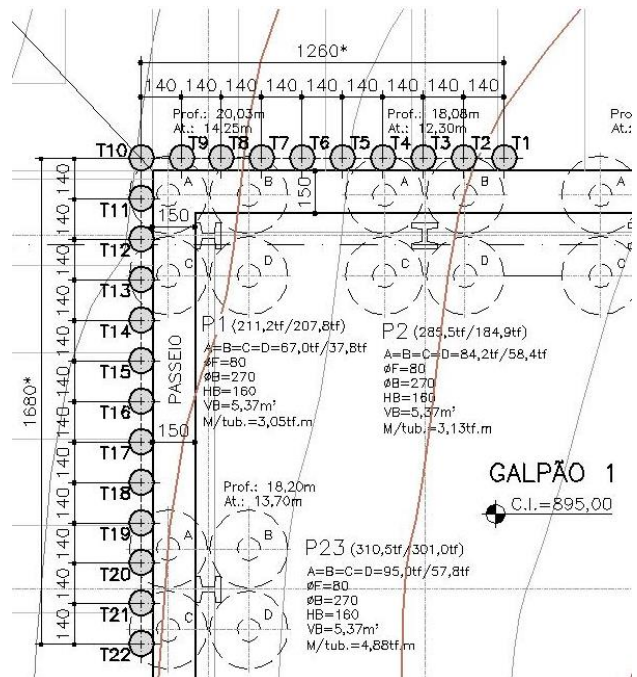


Figura 16. Croqui de reforço do maciço

A sugestão para tal reforço consiste na execução de 22 tubulões com $\varnothing_{\text{fuste}}=90\text{cm}$ integralmente armados com $13\varnothing 20,0\text{mm}$ e profundidade total de 20,0m (mesma profundidade dos tubulões de fundação na região).

A edificação possui estrutura em elementos de concreto pré-fabricados, onde a capacidade de absorção de esforços/deformações é limitada, justificando as medidas preventivas adotadas.

6 CONCLUSÕES

A concepção inicial da edificação previa que a laje de piso fosse apoiada nos blocos de fundação, ou seja, que não haveria transmissão dos esforços verticais provenientes da sobrecarga diretamente sobre o platô do aterro. Porém, essa concepção foi alterada, o que demandou uma série de análises de estabilidade dos taludes de jusante e dos esforços solicitantes que essa sobrecarga induz nos elementos de fundação.

Este trabalho exemplifica a importância da análise das deformações em aterros ou maciços deformáveis quando da aplicação de tensões. Somente as verificações pelo método de equilíbrio-limite podem não ser suficientes

para detectar futuras patologias estruturais advindas da movimentação do maciço.

A sugestão para reforço e proteção da estrutura é de carácter puramente preventivo, visto que a estrutura não possui qualquer indício de patologia (trincas, fissuras, movimentações, etc.).

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
(2009) NBR 11682 Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, 33p.
- GERSCOVICH, D. Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, Oficina de Textos, 2012. 168p.
- GUIDINCI, G & NIEBLE, C.M. Estabilidade de Taludes naturais e de escavação. São Paulo, EDUSP, 1976.