

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/141

Adequações de Projeto de Aterro Industrial em Solo Residual de Arenito

Eduardo Bonow Simões, Me.

Eng. Civil, BSE Engenharia Geotécnica e Ambiental, Porto Alegre/RS, Brasil, eduardo@bseengenharia.com

Luiz Antônio Bressani, Phd

Eng. Civil, BSE Engenharia Geotécnica e Ambiental, Porto Alegre/RS, Brasil, labressani@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta avaliações de estabilidade da ampliação de um aterro industrial cuja área de implantação encontra-se parcialmente sobre uma espessa camada de solo residual de arenito de baixa resistência ($N_{spt} < 6$). Para definição dos parâmetros geotécnicos foram retiradas amostras indeformadas para execução de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais a partir de trincheiras de inspeção, além de ensaios de caracterização, como limites de consistência e granulometria. A partir de extensa investigação de campo, foram estabelecidos os perfis estratigráficos da fundação e definido o setor mais crítico para análise de estabilidade, cujo fator segurança mínimo desejado é 1,5 (proximidade de área de permanência de pessoas, caracterizando um nível alto de segurança desejado contra perda de vidas humanas). As análises iniciais de estabilidade do projeto resultaram em fatores de segurança abaixo do limite preconizado por norma, de forma que foram propostas alterações de geometria, descritas no artigo, para garantir a viabilidade do empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro industrial, Análise de Estabilidade, Resistência ao cisalhamento, Fator de Segurança.

ABSTRACT: This paper presents stability analyses of an industrial landfill expansion whose implantation area is partially over a thick layer of low-resistance sandstone residual soil ($N_{spt} < 6$). To define its geotechnical parameters, undisturbed samples have been taken from inspection trenches to perform direct shear and triaxial tests, in addition to characterization tests, such as consistency limits and particle size. Based on extensive field investigation, the stratigraphic profiles of the foundation were established and the most critical sector for stability analysis was defined, whose minimum desired safety factor is 1.5 (proximity to area where people stay, characterizing a high level of desired safety against loss of human life). The stability analyzes of the initial project resulted in safety factors below the limit recommended by standards, so geometric changes have been proposed, as described in the article, to guarantee the viability of the project.

KEYWORDS: Industrial landfill, Stability Analysis, Shear strength, Safety Factor.

1 INTRODUÇÃO

Aterros industriais são projetados baseados no princípio da manutenção da impermeabilidade e estabilidade para contensão de resíduos. Sob este ponto de vista, a estabilidade global é uma análise fundamental na verificação de segurança do projeto, sobretudo quando o empreendimento está localizado em uma área geotécnica de grande heterogeneidade de materiais, tanto pela origem geológica quanto pela alteração intempérica ao longo do tempo.

O presente trabalho apresenta a caracterização geomecânica da fundação de um aterro industrial em Capela de Santana/RS, caracterizada por uma espessa camada de solo residual de arenito com baixo índice de golpes a penetração ($N_{spt} < 6$) e as adequações de projeto que foram projetadas em função desta condicionante.

2 ÁREA DE ESTUDO

O aterro industrial estudado está localizado no município de Capela de Santana, RS, cerca de 50km ao norte de Porto Alegre. Na região do aterro é observada predominantemente a Formação Botucatu, caracterizado por arenitos de composição fina e média, quartzosos, de coloração rosada, originária de depósitos de dunas eólicas. No Rio Grande do Sul, os arenitos da Formação Botucatu são encontrados abaixo dos fluxos basálticos, mas também entre camadas (Martins et al., 2005). Nessa mesma região também é observada a presença dos arenitos da Formação Pirambóia, considerados uma fácies fluvial da Formação Botucatu. São arenitos mais esbranquiçados, de cor amarela a vermelha, com granulometria média a muito fina, mal selecionados com ocorrências de finas intercalações de argilitos e siltitos (Petri e Fúlfaro, 1983). A figura 1 apresenta a geologia local.

A área estudada é uma ampliação de um aterro existente com aproximadamente 46.500m², para recebimento de resíduos industriais não perigosos. A geometria original da ampliação é apresentada na figura 2, sendo limitada ao norte por uma célula de aterro existente, e nas demais direções por diques de contenção.

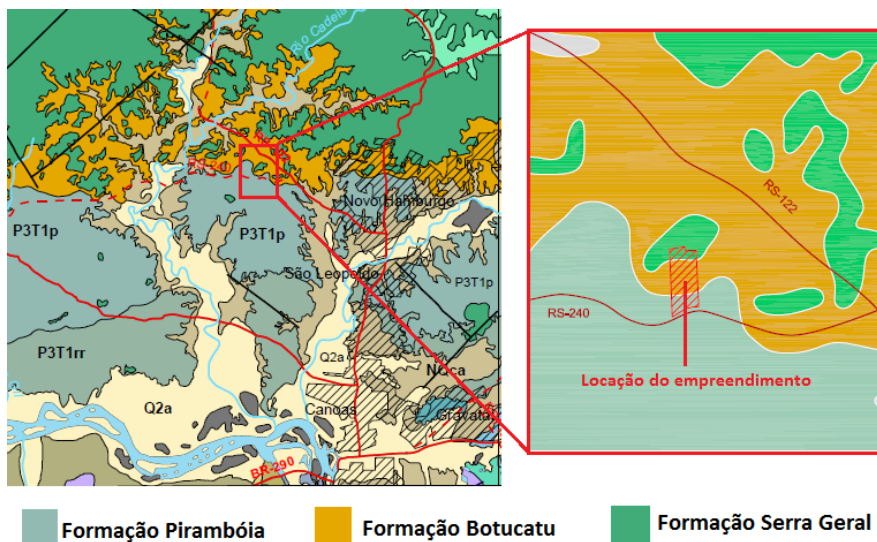


Figura 1. Geologia local.

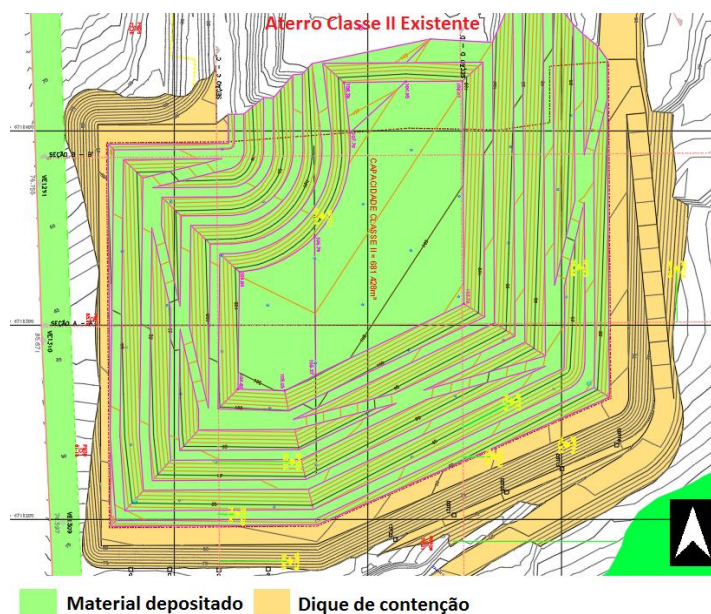


Figura 2. Layout da ampliação e área de estudo

3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

As investigações geotécnicas foram divididas em atividades de campo e de laboratório.

3.1 Investigações de campo

A investigação de campo foi realizada através de sondagem SPTs, conforme resultados apresentados na figura 3. Tipicamente foi observada uma camada superficial de argila arenosa de cor marrom avermelhada e espessura entre 1 e 3m com N_{spt} variando entre 2 a 5 golpes. Abaixo dessa argila superficial é observada uma espessa camada de solo residual de arenito com número de golpes inferior a 6, com maior espessura e presença na porção sul da área de ampliação. Os resultados das sondagens mostraram que, à medida que se desloca para o norte, essa camada com baixo índice de golpes desaparece e a transição para solos residuais de maior resistência a penetração é mais clara, conforme mostrado na seção transversal da figura 4.

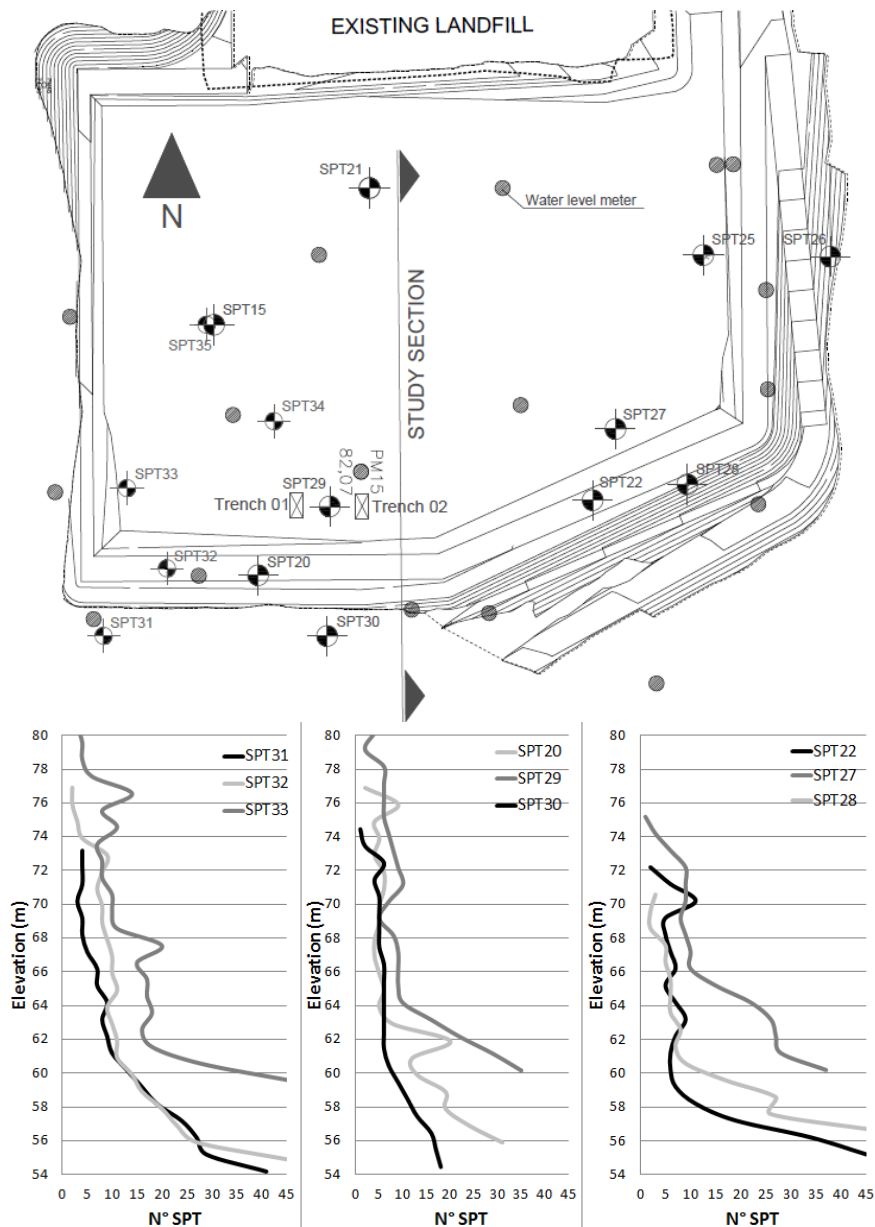


Figura 3. Localização e perfil dos principais furos de sondagem

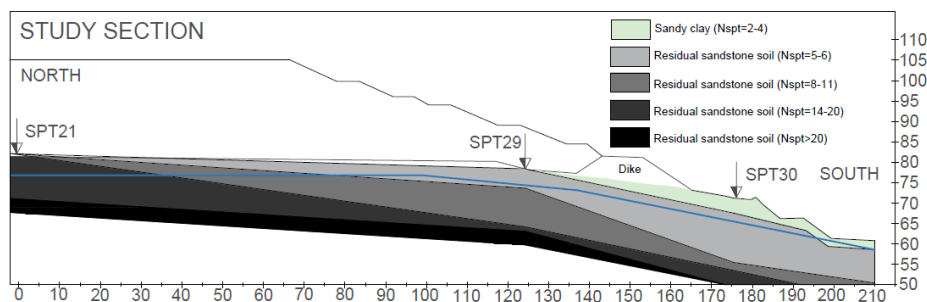


Figura 4. Seção transversal de análise (sentido N-S)

Foram executadas duas trincheiras de inspeção para determinação dos horizontes e para retirada de amostras indeformadas (figura 5) e deformadas das duas primeiras camadas de solo: (i) argila arenosa superficial e (ii) o solo residual de arenito com índice de golpes inferior a 6. O solo residual de arenito apresenta coloração rosada, tendendo ao marrom avermelhado à medida que fica exposto ao tempo. Raramente foram observadas as estratificações ou outras estruturas herdadas da rocha mãe. Foram encontrados diversos aglomerados de argila cinza escura de aspecto orgânico (figura 6), com formatos sub-arredondados e dimensões centimétricas (1-3 cm).



Figura 5. Retirada de amostras indeformadas (a) bloco para moldagem de ensaio triaxial (b) anel de cisalhamento direto



Figura 6. Aglomerados de argila no solo eluvial de arenito

3.2 Investigações de laboratório

Foram realizados ensaios de granulometria, peso específico real dos grãos, limites de Atterberg conforme ABNT NBR 6459 (1984) e ABNT NBR 7180 (1984) e demais índices físicos. O ensaio de

granulometria foi realizado conforme ABNT NBR 7181 (1984). Deve-se ressaltar que a acurácia das curvas de distribuição granulométrica para solos residuais finos é questionável quando comparado a solos sedimentares grosseiros, pois os tratamentos químicos e mecânicos no processo de separação dos grãos muitas vezes altera o tamanho efetivo das partículas, ao ponto que a granulometria obtida em laboratório é distinta daquela do estado natural (Lambe e Whitman, 1979). Esse efeito é mais pronunciado em solos residuais por apresentarem suas estruturas em formas de grumos (Heidemann, 2015). Com objetivo de obter uma granulometria mais fidedigna com a de campo foi realizado um ensaio granulométrico sem uso de defloculante, com lavagem e sem o manuseio do solo pelo operador.

A resistência ao cisalhamento foi determinada através de ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais consolidados drenados (CID). Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com cargas verticais de 50, 100, 200 e 400 kPa, inundados, permitindo-se o adensamento por um período não inferior à 12 horas. Os corpos de prova foram submetidos ao cisalhamento com velocidades constantes de 0,00096m/s, suficientemente baixa para garantir a dissipação de eventual excesso de poro-pressão. Os ensaios triaxiais CD foram consolidados isotropicamente, seguindo as seguintes fases: (i) saturação por percolação; (ii) saturação por contrapressão em estágios de 50kPa até satisfazer condição de 0,95 do parâmetro B; (iii) consolidação isotrópica utilizando tensões de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa; e (iv) cisalhamento drenado até deformação axial de 10%.

Os corpos de prova utilizados nos diversos ensaios foram retirados de duas trincheiras conforme locação apresentada na figura 3. São denominados corpos de prova TR01 para o material retirado da trincheira 01 e TR02 para a trincheira 02.

3.2.1 Granulometria e limites

As curvas granulométricas são apresentadas na figura 7. O solo residual de arenito retirado das duas trincheiras apresentou a mesma granulometria com aproximadamente 60% de areia fina e média e 40% de finos (silte e argila). Para o ensaio realizado sem uso de defloculante, com lavagem e sem manuseio pelo operador, foi observada uma grande redução da fração argilosa, acumulada como fração silte, enquanto a areia permaneceu inalterada.

Os valores médios para os limites de consistência são 34% para o LL, 22% para LP e 12% de IP. A média do peso específico real dos grãos foi de 25,75 kN/m³.

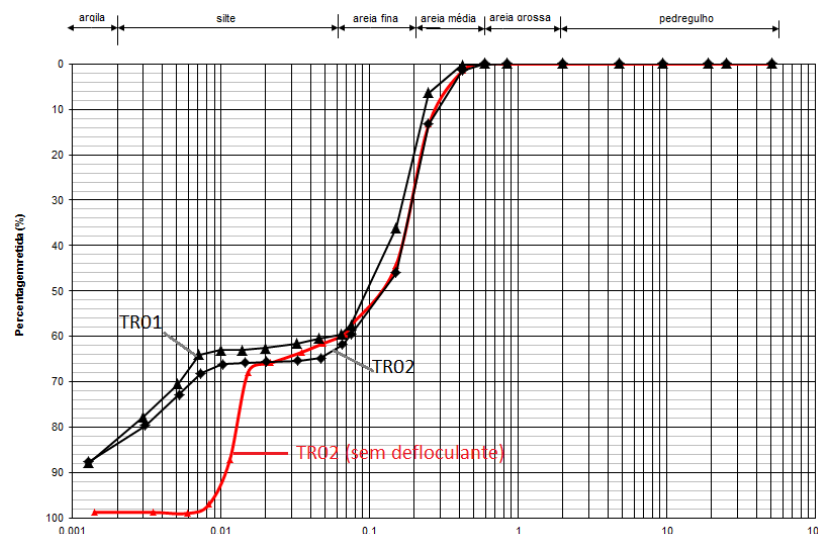


Figura 7. Granulometria

3.2.2 Resistência ao cisalhamento

Tendo em vista a facilidade e rapidez do cisalhamento direto, foram realizados 03 conjuntos de ensaios em amostras indeformadas (01 na camada mais superficial caracterizada por uma argila arenosa e 02 conjuntos

no solo residual de arenito). Em relação a camada superior, os parâmetros de resistência obtidos no ensaio foram de $c'=18$ kPa e $\Phi=27^\circ$.

Em relação aos ensaios relacionados à camada de solo residual de arenito, para os corpos de prova indeformados obtidos da TR01 os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram de $c'=42,8$ kPa e $\Phi=17,1^\circ$. Enquanto para amostras TR02 foram de $c'=30,4$ e $\Phi=21,1^\circ$. Esses valores apresentaram baixo ângulo de atrito e elevada coesão para solos advindos de arenitos. A amplitude nos parâmetros de resistência está relacionada com a diferença de comportamento dos corpos de prova ensaiados à tensão vertical de 400 kPa. Para envoltória de ruptura considerando os ensaios nas três tensões mais baixas, os valores de coesão ficam entre 30 e 33kPa e 22° para o ângulo de atrito. A figura 8 apresenta as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

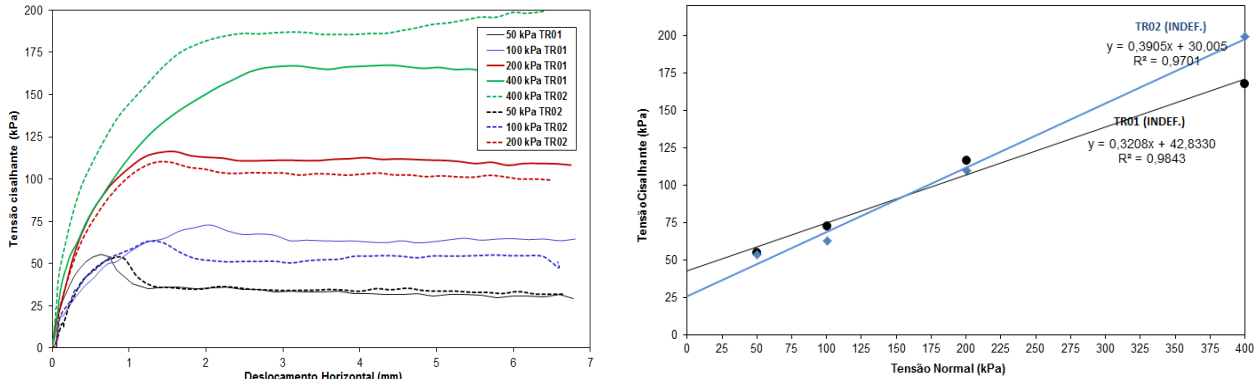


Figura 8. Curvas tensão deformação dos corpos de prova ensaiados

Nos ensaios triaxiais o corpo de prova indeformado consolidado na tensão mais baixa apresentou pico de resistência, mas ainda assim de forma bastante discreta, sendo a única amostra que não atingiu a plastificação na fase da consolidação isotrópica, demonstrando o baixo grau de cimentação do solo. Os resultados são apresentados na figura 9. Ademais, para as duas tensões de confinamento maiores, houve um ganho de resistência a medida que o corpo de prova acumulava deformações, fato contrário ao observado nas amostras submetidas a tensões de confinamento mais baixas. Esse fenômeno é interpretado como a mobilização de resistência através do contato dos grãos, ou seja, um efeito relacionado a textura (tamanho e formato dos grãos) e não mais da cimentação e fábrica, ambas reduzidas no processo de consolidação. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para esse ensaios na condição indeformada foram de 40,4 kPa de coesão e $23,3^\circ$ de ângulo de atrito para os valores de tensões de cisalhamento máximas atingidas no ensaio.

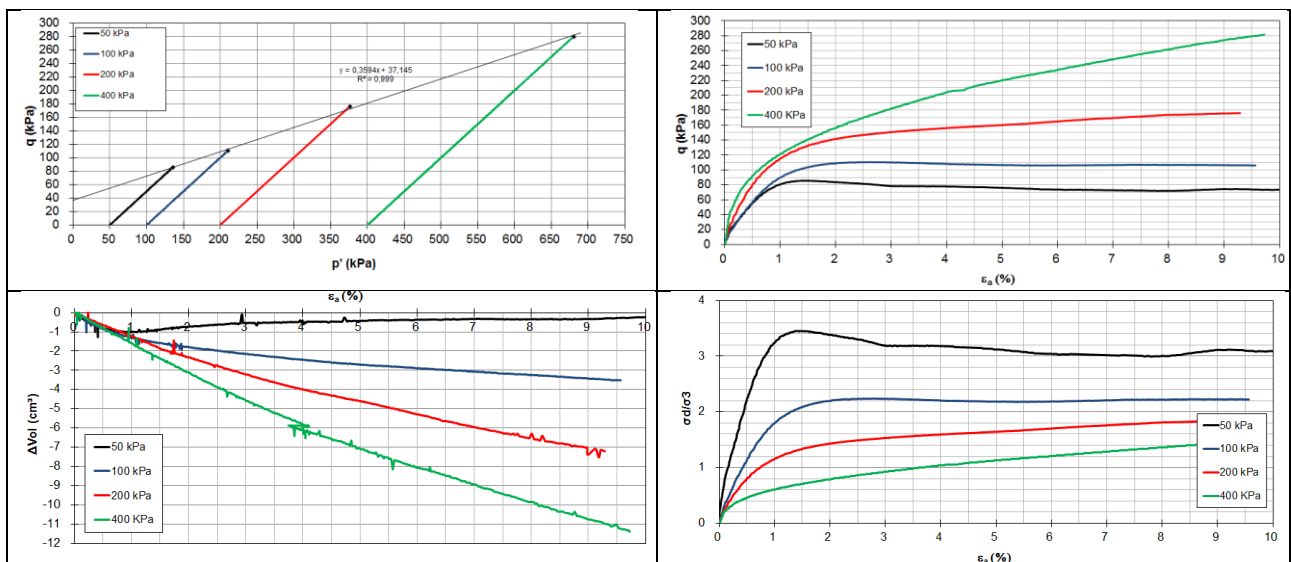


Figura 9. Resultados dos ensaios triaxiais em solo residual de arenito

4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade avaliada apresentada neste trabalho limita-se à avaliação da estabilidade pela fundação. A seção apresentada é a seção crítica (com o menor fator de segurança). Algumas considerações com relação ao modelo geomecânico: (i) foi analisado o cenário de maior carregamento; (ii) foi adotado nível d'água máximo histórico; (iii) foram analisadas superfícies de ruptura circulares pelo método Bishop Simplificado, pois não foi observado nenhum indício nas investigação de campo de contatos menos resistentes; (iv) a geometria do modelo e a estratificação da fundação é baseada na figura 4.

Tabela 1. Parâmetros de Resistência ao cisalhamento

Classe de solo	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico (°)	Observação
Argila arenosa N _{spt} =3-5	18	27	19	Ensaio
Solo residual arenito N _{spt} =5-6	36	18	19	Ensaio
Solo residual arenito N _{spt} =8-10	15	28	19	Estimado
Solo residual arenito N _{spt} =15-20	-	36	19	Estimado
Solo residual arenito N _{spt} >20	-	38	20	Estimado
Argila compactada	15	24	19,5	Ensaio

Utilizando dos parâmetros de resistência apresentados na tabela 1, o fator de segurança obtido para geometria original de projeto foi de 1,38 (seção da figura 4), abaixo do fator de segurança mínimo de 1,5 preconizado pela Norma ABNT NBR 11.682, pois está próximo de uma área de permanência de pessoas, caracterizando um nível alto de segurança desejado contra perda de vidas humanas. Como medida de adequação do projeto, foram avaliadas diversas geometrias, dentre elas, o recuo do dique sul em 15m no sentido Norte. Essa medida foi considerada como a mais adequada, com o menor impacto na concepção original do projeto. A figura 10 apresenta a análise de estabilidade da geometria final.

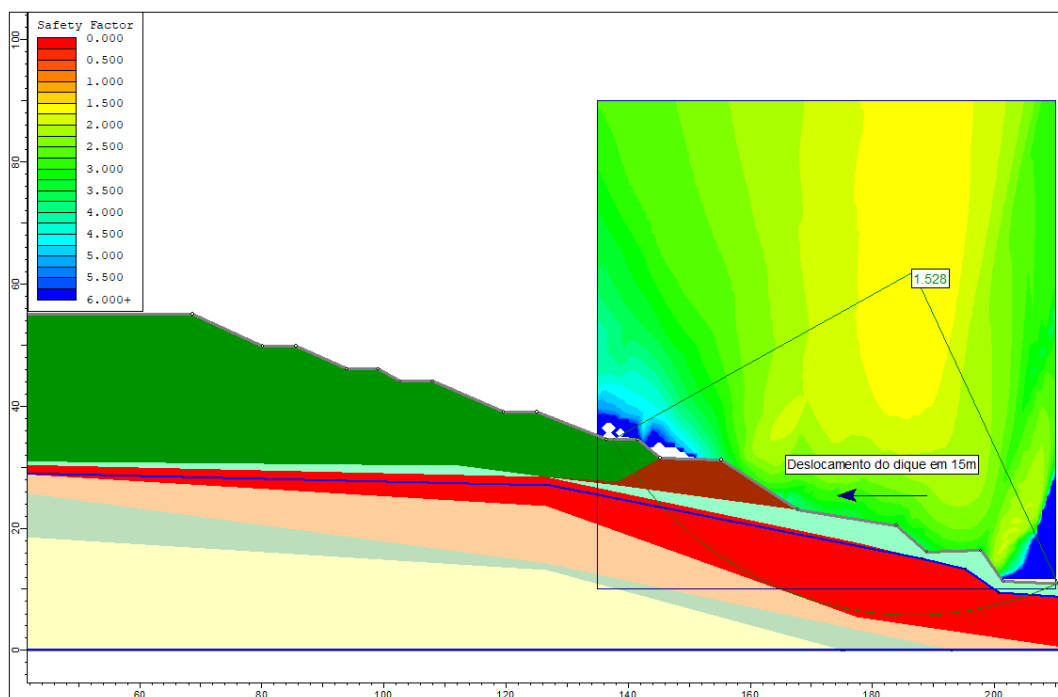


Figura 10. Análise de estabilidade da geometria final da seção crítica

5 CONCLUSÕES

Após a análise de uma ampla campanha de investigação de campo e laboratório, incluindo trincheiras de inspeção, foi possível elaborar modelos geomecânicos ajustados às condições de campo, tomando em consideração a estratigrafia das principais camadas de solo, e seus respectivos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais drenados indicaram parâmetros de resistência da ordem de 17-22° de ângulo de atrito e 30-43 kPa de coesão.

Utilizando estes parâmetros, ficou demonstrado que a estabilidade da porção Sul da área de ampliação do Aterro Industrial de Capela de Santana é fortemente relacionada à resistência de uma espessa camada de solo residual de arenito, com baixo índice de golpes a penetração. As análises de estabilidade por equilíbrio limite demonstraram que os fatores de segurança calculados eram insuficientes e abaixo do nível de segurança desejado. Para adequação do projeto e construção segura, o dique sul (limite da área de operação) foi recuado em 15m, atendendo o fator de segurança de 1,5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181. *Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6459. *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7180. *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508. *Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10004.. *Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Brasil . Ministério das Minas e Energia. (1984), Departamento Nacional da Produção Mineral. *Geologia do Brasil*. Brasília.
- Heidemann, M. (2015). *Estudo dos solos de uma encosta instável em São José – SC: Intemperismo e comportamento geotécnico*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 298 f.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*, SI Version. John. Wiley & Sons, New York, 553 p.
- Martins, F. B.; Ferreira, M. V.; Flores, J. A. A.; Bressani, L. A.; Bica, A. V. D. (2005). Interaction between Geological and geotechnical investigations of a sandstone residual soil. *Engineering geology*, n. 78, pp. 1-9.
- Petri, S.; Fúlfaro, V. J. (1983). *Geologia do Brasil*. 1. Reimpressão. T. A. Queiroz, São Paulo. 631 p.