

Uso de contenção tipo solo reforçado para verticalizar aterro de um complexo eólico executado com solo residual e enrocamento

Robson Melo do Nascimento

Engenheiro Civil, Maccaferri do Brasil Ltda, Recife-PE, Brasil, r.melo@maccaferri.com

M.Sc. Ronaldo Ramos de Oliveira

Engenheiro Civil, Maccaferri do Brasil Ltda, Salvador-BA, Brasil, r.oliveira@maccaferri.com

D.Sc. Petrucio José dos Santos Junior

Engenheiro Civil, Maccaferri do Brasil Ltda, Jundiaí-SP, Brasil, p.santos@maccaferri.com

RESUMO: Este estudo descreve um caso de obra em que uma contenção em solo reforçado foi empregada para a verticalização de um talude de aterro durante a construção do platô de uma subestação, localizada em no estado do Rio Grande do Norte em uma região de relevo acidentado com solos classificados como Neossolos Líticos Eutróficos rasos e assentes sobre topo rochoso. Para caracterização do terreno e solo a ser utilizado, foram realizados 8 furos de sondagem e 56 ensaios de cisalhamento direto. A implementação do muro teve como principal objetivo evitar que o avanço do aterro comprometesse uma área de proteção permanente, com utilização do solo local para aterro estrutural e integração ao meio ambiente. Para fins de otimização do projeto, foi projetado um Terramesh System com 9m de altura e um terrapleno com média de 4m de altura e inclinação de 1(V):1,75(H). Algumas vantagens da escolha são relevantes, dentre elas, destacam-se a possibilidade de reutilização dos blocos de rocha resultantes do desmonte para a construção da estrutura de contenção e a execução do muro que ocorreu de forma simultânea às atividades de terraplanagem, contribuindo para uma significativa velocidade no processo construtivo.

PALAVRAS-CHAVE: Muro de Contenção, Solo reforçado, Complexo eólico, Solo residual.

ABSTRACT: This study describes a case of work in which reinforced soil containment was used to verticalize an embankment slope during the construction of the plateau of a substation, located in the state of Rio Grande do Norte in a region of rugged terrain with soils classified as shallow Eutrophic Lithic Neosols and resting on a rocky top. To characterize the terrain and soil to be used, 8 drilling holes and 56 direct shear tests were carried out. The main objective of implementing the wall was to prevent the advance of the landfill from compromising a permanent protection area, using local soil for structural landfill and integration into the environment. For project optimization purposes, a 9m-high Terramesh System and an embankment with an average height of 4m and a slope of 1(V):1.75(H) were designed. Some advantages of the choice are relevant, among them, the possibility of reusing the rock blocks resulting from dismantling for the construction of the containment structure and the execution of the wall that occurred simultaneously with the earthmoving activities, contributing to a significant speed in the construction process.

KEYWORDS: Retaining wall, Reinforced soil, Wind complex, Residual soil.

1 INTRODUÇÃO

Com investimentos bilionários no setor de energias renováveis, a região Nordeste se consolida como um polo energético nacional. O estado do Rio Grande do Norte possui grande potencial em geração de energia eólica, contando com diversos parques distribuídos ao longo do estado. Os complexos eólicos são formados basicamente por aerogeradores, subestações e linhas de transmissão. A instalação destes equipamentos é realizada comumente em áreas remotas, regiões de relevo acidentado e difícil acesso, tornando tanto o projeto quanto a execução das obras um desafio para engenharia geotécnica.

Diante da morfologia no local onde os parques eólicos são implantados, é comum a realização de obras estruturantes para conter cortes em encostas naturais ou taludes construídos em aterros, verticalizando desníveis em limite de terreno de maneira geral. Gerscovich (2016) define que muros são estruturas de

contenção de parede vertical ou quase vertical apoiadas em uma fundação rasa ou profunda com o objetivo de conter maciços de solos. A obra em questão fez uso de uma contenção em solo reforçado com 9 metros de altura e 120 metros de extensão, para verticalizar um talude de aterro, evitando que a projeção do talude inicialmente proposto não ultrapassasse o limite da área licenciada pelo órgão ambiental. Por tanto, uma contenção que minimizasse os impactos e se integrasse de forma rápida ao meio era fundamental.

Na superfície do terreno e em sua subsuperfície foram encontradas misturas de solos, saprolitos e blocos de rocha alterada, além de afloramentos rochosos. A premissa adotada pelos investidores no estudo de viabilidade para escolha do local e implantação do empreendimento, foi o reaproveitamento dos materiais obtidos a partir de corte como compensação em áreas de aterro determinadas no projeto de terraplenagem, justificado pela dificuldade de acesso, pois a obra se encontrava em uma área remota. Os ensaios realizados in situ e em laboratório atestaram a qualidade do material, permitindo, após seleção, ser utilizado como aterro estrutural do muro. Os materiais provenientes do desmonte de rocha foram utilizados em aterro com enrocamento sobre a estrutura de contenção para execução do platô e como enchimento das gaiolas do Terramesh System.

O presente trabalho apresentará ao longo das seções, aspectos relevantes da solução de contenção adotada e os benefícios que a técnica trouxe para a obra da subestação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi composta pelas seguintes etapas:

- Localização da obra, caracterização geológica da área estudada, geomorfologia e pedologia da região através de mapas e bibliografia de referência;
- Topografia realizada através de levantamento planialtimétrico para projeto de terraplenagem;
- Ensaios geotécnicos compostos por campanha de reconhecimento de campo, complementados por ensaios de laboratório;
- Proposta de solução e análise de estabilidade da estrutura de contenção.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Geológica, Morfologia e Pedologia

O empreendimento está situado no município de Santana do Matos, Coordenadas 5°51'54''S e 36°21'21''W, sistema de referência (Datum) WGS84, se encontra geologicamente inserido na Província Borborema. Conforme Relatório Diagnóstico do Município de Santana dos Matos (2005), de autoria da CPRM, é constituído por litótipo do Complexo Caicó, representado por ortognaisses dioríticos a graníticos, com restos de supracrustais, de 2,3 bilhões de anos atrás, unidade litoestratigráfica paleoproterozóico (era geológica). A Figura 1 apresenta a localização da subestação bem como sua caracterização geológica.

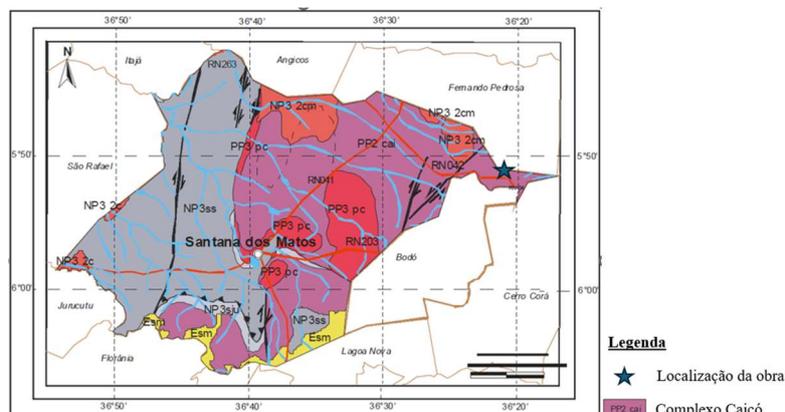


Figura 1. Mapa geológico da cidade de Santana dos Matos. Fonte: CRPM (2005)

Brito (2020), relata que no relevo local da região de Santana dos Matos, existem variações e alternância entre planícies e planalto com cotas altimétricas variando de 50 a 700 metros de altitude. O platô da subestação

está situado a 400 metros de altitude. No tocante a da pedologia da região, de acordo com a classificação da Embrapa (2006), os solos que predominantemente que cobrem o território são classificados como Neossolos Líticos Eutróficos, por serem solos assentes diretamente sobre a rocha, identificados como solos rasos, com aspecto pedregoso, rico em minerais, mas pobre em matéria orgânica, ou seja, são solos pouco profundos com fertilidade natural baixa.

3.2 Levantamento topográfico

O Levantamento planialtimétrico foi realizado com intuito de conhecer a superfície do terreno. A determinação das curvas de nível além das seções transversais deram subsídio para o projeto de terraplenagem, indicando os trechos de corte e aterro para a construção do platô. Nas áreas em aterro dos bordos do platô, foi prevista a execução de taludes com enrocamento oriundos do desmonte de rochas das áreas de corte, com declividade 1V:1,75H, para transpor o desnível entre o terreno natural e a cota de projeto. Porém, em um trecho do terreno, em seu limite, a projeção horizontal deste talude invadiria uma área de proteção ambiental permanente, por tanto, foi necessária uma obra estruturante com a construção de um muro de contenção para verticalizar o aterro da terraplenagem. A área de proteção e a locação dos muros são apresentas na Figura 2.



Figura 2. Área de proteção permanente e locação do muro de contenção.

3.3 Ensaios geotécnicos

De acordo com Monticelli (2021), investigações geológico geotécnicas correspondem aos procedimentos e técnicas de campo e laboratório, visando obtenção de informações do meio físico de interesse ao estudo. A caracterização do solo de fundação onde estrutura de contenção estaria assentada, seu aterro estrutural, bem como índices físicos e parâmetros de resistência foram obtidos através das seguintes etapas:

- Etapa de campo
 - 6 Trincheiras de reconhecimento;
 - 8 Sondagens mecânicas tipo SPT (Standard Penetration Test) para a camada em solo e 8 sondagens rotativas para o extrato rochoso.
- Etapa de laboratório
 - 7 Ensaios de caracterização granulométrica;
 - 7 Ensaios de compactação;
 - 28 Ensaios de cisalhamento direto em amostras deformadas, compactadas, realizado na condição de umidade ótima, seguidos de mais 28 Ensaios de cisalhamento direto em amostras deformadas, compactadas em umidade ótima, realizado na condição inundada.

As trincheiras confirmaram o estudo prévio realizado sobre a pedologia da região, pequena espessura de solo com alteração de rocha sendo encontrada em pequena profundidade. Através das sondagens mecânicas SPT (Standard Penetration Test) e rotativa, foi possível obter o perfil estratigráfico típico, com

profundidade limite predefinida em 6 metros. A partir das sondagens também foi possível obter a medida de resistência à penetração para a camada de solo através do número NSPT, além da obtenção do RQD (%), índice de qualidade de rocha, calculado a partir de testemunhos de sondagem. A Figura 3 mostra registro da execução das trincheiras, manobra com testemunho de sondagem, a Tabela 1 apresenta um resumo do perfil estratigráfico típico com os índices NSPT e RQD (%).



Figura 3. (1) Execução das trincheiras de reconhecimento, (2) e (3) testemunhos de sondagem SPT e Rotativa.

Tabela 1. Perfil estratigráfico típico, espessura das camadas, NSPT e RQD (%).

Classificação do material encontrado	Espessura (m)	NSPT	RQD (%)
Solo Residual – Areia média com silte	1,45	38	-
Solo de alteração de Gnaiss - Areia média/fina argilosa com pedregulho	0,95	45	-
Biotita-Augen Gnaiss - Rocha branda	1,20	50	15%
Biotita-Augen Gnaiss Migmatizado - medianamente resistente a resistente	2,40	-	51%

Conforme mencionado nas seções anteriores, o material proveniente dos cortes era de interesse para utilização como camada de aterro estrutural para execução do muro, estes precisaram ser estudados em laboratório para liberação e uso na obra.

Os ensaios de granulometria mostraram que todas as amostras são constituídas predominantemente por areias. Quanto aos Limites de Atterberg, o solo foi classificado como não plástico devido ao elevado percentual de areia. Diante das frações apresentadas, as amostras foram classificadas como uma areia bem graduada (SW), de acordo com o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos).

Ensaio de compactação de Proctor foram realizados para determinação da umidade ótima e densidade secas máximas do aterro. Conforme curvas de compactação de diversos solos brasileiros (Figura 4), apresentada por Pinto (2009), densidades secas máximas elevadas, da ordem de 2 a 2,1 kg/dm³, e umidades ótimas baixas de aproximadamente 9 a 10%, são representativas de areias com pedregulho. A Tabela 2 apresenta o resumo dos ensaios de compactação.

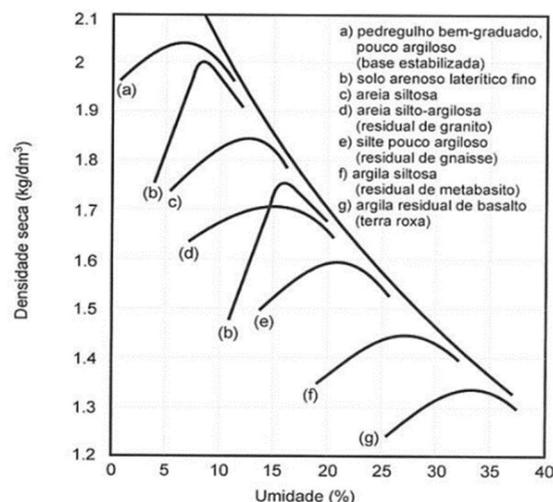


Figura 4. Curvas de compactação de diversos solos brasileiros. Fonte: Pinto (2009)

Tabela 2. Resumo dos ensaios de compactação.

Amostra	γ_d (kg/dm ³)	h (%)
1	1,95	5,8%
2	2,01	7,7%
3	1,97	7,1%
4	1,99	6,1%
5	20,85	5,9%
6	19,83	5,8%
7	20,45	4,7%

Conforme Pinto (2009), o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Coulomb. Aplica-se uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura. No estudo em questão, foram conduzidos ensaios de cisalhamento direto do tipo CD, com todas as amostras compactadas à umidade ótima, sendo metade delas submetidas a cisalhamento na umidade ótima e a outra metade sob condição de inundação prévia. Estes ensaios foram realizados em diferentes níveis de tensão confinante (50, 100, 200 e 400 kPa) com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência do aterro estrutural. A Tabela 3 apresenta o resumo dos ensaios.

Tabela 3. Resumo dos ensaios de cisalhamento direto.

Amostra	Umidade ótima		Inundado	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
1	40	38	3	38
2	56	35	17	33
3	8	40	2	36
4	22	35	22	34/
5	13	38	10	34
6	21	37	15	37
7	35	37	6	40

3.4 Proposta de solução e análise de estabilidade da estrutura de contenção

A proposta de solução indicou muro de contenção em solo reforçado tipo Terramesh System, com aterro de material de boa qualidade compactado ao tardo da estrutura. Este tipo de solução é formada por uma estrutura em solo reforçado, constituída por elementos metálicos em malha hexagonal de dupla torção, que ao mesmo tempo formam o paramento externo, com aparência similar ao de um gabião caixa, e o painel de reforço que interage mecanicamente com o solo. A execução do muro segue a seguinte sequência executiva:

1. Preparação do local com regularização do terreno onde a estrutura estará assentada e locação topográfica do alinhamento frontal da contenção;
2. Montagem do Terramesh de modo semelhante à execução dos Gabiões Caixa, onde todas as arestas devem ser devidamente costuradas e o preenchimento com material pétreo selecionado;
3. Finalizadas as preparações das peças Terramesh, deve-se lançar o material de aterro com cuidado evitando qualquer movimento com equipamentos sobre os reforços. O aterro deve ser compactado em camadas não superiores a 25 cm onde é extremamente importante o controle de compactação do mesmo.
4. Compactação executada em dois setores: na faixa de 1,00m junto ao paramento frontal deve-se executar a compactação de forma manual evitando o deslocamento e a deformação da face. A área restante pode ser compactada com equipamento mecânicos pesados que atendam as especificações de projeto.
5. Todo o processo é repetido até a conclusão do muro.

Por conta da elevada porosidade no corpo do aterro em enrocamento, possibilidade de percolação, foi prevista uma camada de solo-cimento (dosagem 1:10, em peso de solo seco), para atuar como selo no topo do aterro do muro. Os geocompostos drenantes ao tardo do aterro e drenos de pedra na fundação da estrutura, objetivaram servir como elemento separador e de drenagem, impedindo a passagem de água no corpo estrutural do muro, evitando variação de umidade, surgimento de propressão e alteração das propriedades geotécnicas deste aterro. A seção transversal tipo da proposta de solução, além do detalhe do Terramesh System estão expostos na Figura 5.

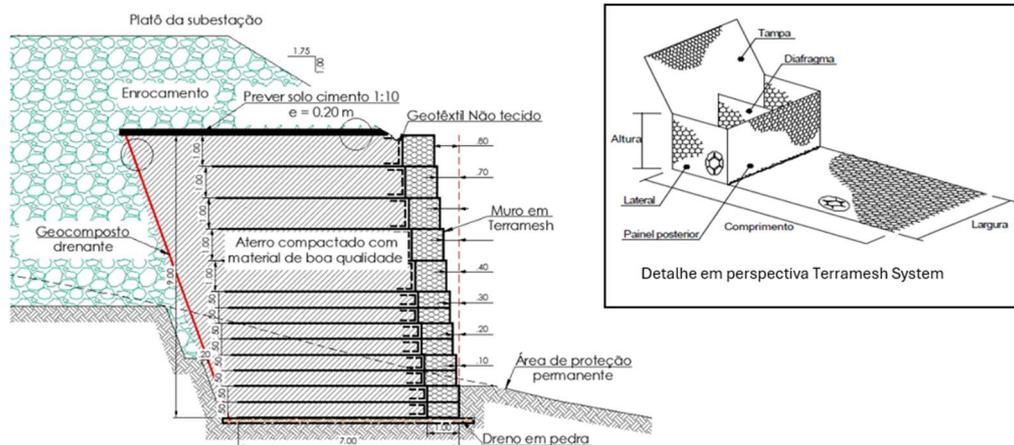


Figura 5. Proposta de solução.

A análise de estabilidade determinística foi realizada através do software Mac.S.T.A.R.S® W 4.0 (Maccaferri Stability Analysis of Reinforced Slopes). O cálculo foi realizado utilizando o método de Bishop simplificado, critério de ruptura de Mohr-Coulomb, considerando sobrecarga acidental de 37 kPa, devido as cargas transferidas ao solo por carretas na instalação da transformadores, exigido pela norma NBR 11682 (2009). A Figura 6 apresenta os detalhes da sobrecarga crítica.

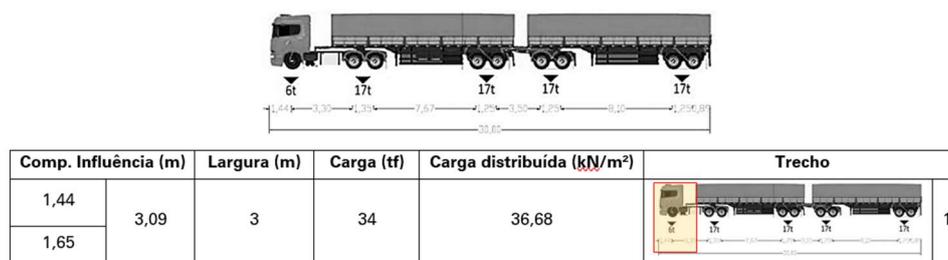


Figura 6. Sobrecarga devido ao fluxo de trem tipo TB740.

Os parâmetros de resistência adotados são apresentados na Tabela 4. Para o aterro estrutural, foi considerado o ensaio inundado de valor mais baixo desprezando a coesão. Para o aterro com enrocamento, foram utilizados valores de ensaios realizados em granitos, em rocha solta, propostos por Hoek e Bray a partir de ensaios de cisalhamento direto em rochas. Já para o gnaiss migmatizado, foi levando em consideração o índice RQD (%) além de utilizar os parâmetros de Hoek e Bray para rocha coesa. Tanto para o aterro em enrocamento quanto para o gnaiss migmatizado foram utilizados os menores valores de parâmetros obtidos.

Tabela 4. Parâmetros de resistência.

Tipo de camada	γ (kN/m³)	c (kPa)	ϕ (°)
Aterro estrutural	19	0	33
Aterro com enrocamento	18	0	40
Gnaiss migmatizado	26	10	30

A Figura 7 apresenta a análise de estabilidade global e verificação como muro da seção de projeto com fator de segurança considerado satisfatório. Também foram realizadas análises exitosas para verificação da estabilidade interna das camadas de reforço.

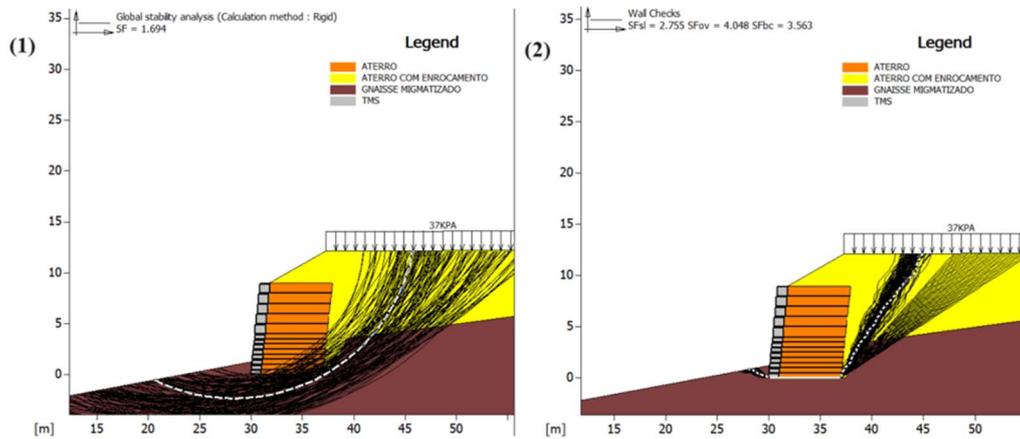


Figura 7. (1) Análise de estabilidade global, (2) verificação da estrutura como muro.

4 DISCUSSÃO

O estudo em questão teve como desafio conter um aterro a ser executado com enrocamento para a construção do platô da subestação impedindo que a obra invadisse uma área de proteção ambiental.

Analisando a geologia e as sondagens do solo onde o muro estaria assentado, ficou constatado que o perfil encontrado é clássico proveniente da alteração de rocha com solo residual. Vargas (1977) define que estes solos são aqueles provenientes da decomposição e alteração das rochas “in situ”, onde o agente de transporte é reduzido a um mínimo.

O solo estudado em campo apresentou bom índice de resistência à penetração já em sua superfície com elevado N_{SPT}. A rocha variou de muito fraturada a pouco fraturada, com classificação RQD de qualidade classificada de fraca a regular, apesar de obter 50 golpes na sondagem SPT no início do trecho em rocha, impenetrável ao amostrador padrão, atingindo critério de parada conforme NBR 6484 (2021).

A respeito da escolha do tipo de contenção, em geral, muros de contenção à gravidade tradicionais necessitam de seções robustas para vencer alturas elevadas, ocupando um considerável espaço do terreno com a utilização de grandes volumes de materiais, se tornando uma solução onerosa do ponto de vista financeiro. Por este motivo e pelas condicionantes da obra, a contenção escolhida foi a de solo reforçado.

Os solos, em geral, possuem elevada resistência a esforços de compressão, porém baixa resistência a esforços de tração. A inclusão de técnicas para estruturar solos com outros materiais é muito antiga. Segundo Palmeira (2018) ainda hoje encontram-se vestígios ou obras em bom estado construídas séculos atrás.

Uma vantagem construtiva da técnica de solo reforçado, é que o muro eleva sua cota junto a compactação do aterro, eles são executados de forma simultânea, trazendo velocidade, fazendo com que ela seja uma solução muito utilizada em áreas de aterro de conquista e recomposição de taludes com grandes erosões onde estão envolvidos expressivos volumes de aterro.

A permeabilidade do paramento frontal da estrutura que garante eficiência da drenagem do aterro contido, além da redução do impacto ambiental devido a rápida integração com o meio ambiente após a construção da obra em uma área de proteção permanente, também foram características relevantes para escolha desta técnica.

Após uma série de testes realizados em laboratório, o solo se mostrou apto para ser reutilizado como aterro estrutural. A possibilidade de uso como aterro além da possibilidade do uso de rochas provenientes de desmonte como preenchimento das caixas do Terramesh System reduziu consideravelmente o custo com transporte, viabilizando financeiramente a solução.

5 CONCLUSÃO

Diante dos desafios enfrentados para a construção da subestação, este estudo ofereceu uma análise a respeito da escolha da técnica de solo reforçado como solução mais adequada. A opção pelo solo reforçado se justificou não apenas pela necessidade de evitar danos à área de proteção ambiental, mas também pela eficiência construtiva e possibilidade de reutilização dos materiais disponíveis na obra.

Após elaboração deste trabalho, concluímos que a intervenção em solo reforçado Terramesh System trouxe benefícios técnicos, econômicos e de prazo para o empreendimento, pois a obra teve duração total de 2 meses, apresentando uma produtividade média de 32m² por dia com uma equipe de 5 homens. A técnica se apresenta como alternativa para obras em regiões de difícil acesso, por fim, uma interessante alternativa em empreendimentos do setor energético.



Figura 8. Obra finalizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (11682). NBR 6484. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Brito, M. S. F. (2020) *Arqueologia da paisagem: a visibilidade e a (in)visibilidade do patrimônio arqueológico no contexto geomorfológico do município de Santana dos Matos, estado do Rio grande do norte, Brasil* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade do estado do Rio Grande do Norte / UERN, 169 p.
- CPRM (2005) *Relatório Diagnóstico do Município de Santana dos Matos*. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17179/1/rel_santana_matos.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- EMBRAPA (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Centro Nacional de Pesquisas de Solos, Rio de Janeiro, BRA. p.306.
- Gerscovich, D., Danziger, B.R., Saramago R. (2016) *Contenções teoria e aplicações em obras*, 2º ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, BRA, 319 p.
- Hoek, E., Bray, J. (1974) *Rock slope engineering*, London Institution of Mining and Metallurgy, London, UK, 309 p.
- Monticelli, J.J. (2021) *Investigações geológico-geotécnicas: guia de boas práticas*, 1º ed., João Jeronimo Monticelli, ABGE, São Paulo, SP, BRA, 526 p.
- Palmeira, E.M. (2018). *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. Oficina de textos, São Paulo, BRA. p.294.
- Pinto, C.S. (2009). *Curso básico de mecânica dos solos*. Oficina de textos, São Paulo, BRA. p.367.
- Vargas, M. (1977) *Introdução a Mecânica dos Solos*, 1ª ed., McGraw Hill do Brasil, São Paulo, SP, BRA, 509 p.