



Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)

Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica



Franciele Braga Machado Tullio
(Organizadora)

Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Natália Sandrini
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie di Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E56	Enfoques e possibilidades para a engenharia geotécnica [recurso eletrônico] / Organizadora Franciele Braga Machado Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-7247-746-8 DOI 10.22533/at.ed.468190611 1. Geologia de engenharia. 2. Mecânica do solo. I. Tullio, Franciele Braga Machado. CDD 624.15136
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Enfoques e Possibilidades para a Engenharia Geotécnica” contempla onze capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas relacionadas as possibilidades de materiais e metodologias aplicadas na área de geotecnia.

A Engenharia Geotécnica desempenha um papel muito importante em nossa sociedade, pois é através do estudo da ação do homem sobre o solo e rochas que torna possível a prevenção de deslizamentos, desabamentos e desmoronamentos, contenção da ocupação de encostas e gerenciamento de resíduos.

Os estudos da área de geotecnia visam a proteção da população, fazendo uso de soluções sustentáveis sem prejudicar o meio ambiente.

A adição de resíduos no solo pode viabilizar a sua utilização em subleito ou sub-base na pavimentação. Assim como a utilização de resíduos industriais em substituição ao uso de brita pode se tornar como alternativa para a confecção de misturas asfálticas onde há escassez desse material.

A engenharia geotécnica apresenta várias possibilidades de proteção de encostas, tais como: drenagem, proteção superficial, construção de muros de arrimo, retaludamento, entre outras técnicas, proporcionando segurança para diversas comunidades.

Diante do exposto, esperamos que o leitor faça bom uso dos estudos aqui apresentados, de modo que sejam subsídio para uma reflexão sobre as possibilidades que a engenharia geotécnica proporciona à sociedade, trazendo qualidade de vida e segurança, utilizando meios sustentáveis e reduzindo danos ao meio ambiente.

Franciele Braga Machado Tullio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ATERROS LEVES SOBRE SOLOS MOLES COM UTILIZAÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA BR-101/PE, LOTE 6: AVALIAÇÃO DA TÉCNICA E CARACTERIZAÇÃO DO EPS QUANTO À COMPRESSÃO SIMPLES	
Fabiano Queiroz de Souza Roberto Quental Coutinho Danisete Pereira de Souza Neto	
DOI 10.22533/at.ed.4681906111	
CAPÍTULO 2	14
DOSAGENS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO SMA COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS	
André Sales Mendes Jander Joia de Figueiredo Costa Júnior Patrícia de Magalhães Aragão Valença Consuelo Alves da Frota	
DOI 10.22533/at.ed.4681906112	
CAPÍTULO 3	26
ESTUDO DA VIABILIDADE TECNOLÓGICA DO EMPREGO DA CAL EM UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO	
Vitor Reinaldo Bordignon Rogério Francisco Kuster Puppi Ronaldo Luiz dos Santos Izzo Amanda Dalla Rosa Johann	
DOI 10.22533/at.ed.4681906113	
CAPÍTULO 4	38
MELHORAMENTO DE SOLO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROCEDENTE DO CEPILHAMENTO RE PAVIMENTOS CCP	
Daniel da Silva Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.4681906114	
CAPÍTULO 5	50
USO DE DRENOS FIBROQUÍMICOS E COLUNAS DE BRITA PARA TRATAMENTO DE SOLOS MOLES NA BAIXADA DE JACAREPAGUÁ - RJ	
Fernanda Valinho Ignacio Bruno Vieira de Jesus Juliano de Lima	
DOI 10.22533/at.ed.4681906115	
CAPÍTULO 6	62
ESTUDO PARA UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTIL PARA ACOMODAÇÃO DE REJEITOS E ESTÉRIL EM SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO POR BACKFILL	
Rafaela Baldí Fernandes Sander Elias Rodrigues	
DOI 10.22533/at.ed.4681906116	
CAPÍTULO 7	78
OCUPAÇÃO ANTRÓPICA DE ENCOSTAS E SUA ESTABILIZAÇÃO	
Paulo Afonso de Cerqueira Luz Alberto Alonso Lázaro	

Henrique Dinis
Kamila Rodrigues Cassares Seko
DOI 10.22533/at.ed.4681906117

CAPÍTULO 8	91
ZONEAMENTO SIMPLIFICADO DE RISCO DE DESLIZAMENTO EM ENCOSTAS NO NORDESTE DO BRASIL	
Belaniza Gaspar Santos Neta Osvaldo de Freitas Neto Erinaldo Hilario Cavalcante	
DOI 10.22533/at.ed.4681906118	
CAPÍTULO 9	105
ESTUDOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS PARA IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM VENTUROSA NO ESTADO DE PERNAMBUCO	
Hosana Emilia Sarmiento Costa Leite Rafaella Teixeira Miranda Maiara de Araújo Porto Túlio Martins de Lima Natália Milhomem Balieiro	
DOI 10.22533/at.ed.4681906119	
CAPÍTULO 10	118
COMPARAÇÃO E PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS) DE ROCHAS ARENÍTIAS TURBIDITICAS DAS FORMAÇÕES SANTOS, BACIA DE SANTOS, BRASIL E DA FORMAÇÃO CHICONTEPEC, BACIA DE CHICONTEPEC, MÉXICO	
Claudia Martins Bhering Dominoni Anna Laura Lopes da Silva Nunes Claudio Rabe Gilmara Alexandre Felipe da Silva Cleverson Guizan Silva	
DOI 10.22533/at.ed.46819061110	
CAPÍTULO 11	130
MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS 3D DE RADIER ESTAQUEADO COMPOSTO POR ESTACAS EMBUTIDAS PARCIALMENTE EM ROCHA	
Jean Rodrigo Garcia Paulo José Rocha de Albuquerque Osvaldo de Freitas Neto Rodrigo Álvares de Araújo Melo	
DOI 10.22533/at.ed.46819061111	
CAPÍTULO 12	144
MELHORAMENTO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS E FÍSICOS DE DEPÓSITOS ALUVIONARES ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DE GEODRENOS VERTICAIS	
Rodrigo Rogério Cerqueira da Silva Bruno Pereira Casanova	
DOI 10.22533/at.ed.46819061112	
SOBRE A ORGANIZADORA	156
ÍNDICE REMISSIVO	157

ESTUDO PARA UTILIZAÇÃO DE TUBOS GEOTÊXTIL PARA ACOMODAÇÃO DE REJEITOS E ESTÉRIL EM SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO POR BACKFILL

Rafaela Baldí Fernandes

NUGEO/UFOP, Ouro Preto, Brasil, rafaecivil@yahoo.com.br

Sander Elias Rodrigues

Maccaferri do Brasil Ltda, Jundiaí, sander_elias@hotmail.com

RESUMO: Alguns métodos de lavra permitem que grandes áreas já lavradas fiquem expostas, fazendo com que a opção de dispor rejeitos e estéril dentro da cava, seguindo o conceito de “backfilling”, seja viável. A concepção de ocupação da cava através do empilhamento de tubos de geotêxtil preenchidos por rejeito sobre a área formada pela lavra, com seções intermediárias preenchidas por estéril, pode representar uma alternativa bem viável para o Backfill. O uso dos tubos possibilitam drenagem da fase líquida e retenção dos sólidos, com uma considerável redução do teor de umidade e consequente redução de volume, já que essa drenagem também proporciona uma acomodação dos sólidos dentro do tubo, desidratando e consolidando o material em seu interior. Este trabalho apresenta um estudo de caso que considera a ocupação de uma cava por sistema backfill pela utilização de tubos de geotêxtil como técnica de disposição de rejeitos e estéril.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de Mineração,

Disposição de Rejeitos, Tubos de Geotêxteis, Backfill.

STUDY FOR USING GEOTEXTILE TUBES FOR TAILINGS AND WASTE IN BACKFILL DISPOSAL SYSTEMS

ABSTRACT: Some mining methods allow large areas already mined to be exposed, making the option of disposing tailings and sterile into the pit following the concept of backfilling is feasible. The conception of pit occupation by stacking tail-filled geotextile tubes over the mined area with barren-filled intermediate sections may represent a very viable alternative to Backfill. The use of the tubes allows liquid phase drainage and solids retention, with a considerable reduction in moisture content and consequent volume reduction, as this drainage also provides a solids accommodation inside the tube, dehydrating and consolidating the material inside it. This paper presents a case study that considers the occupation of a pit by backfill system by the use of geotextile pipes as a waste disposal and sterile technique.

KEYWORDS: Mining Tailings, Tailings Disposal, Geotextile Tubes, Backfill.

1 | INTRODUÇÃO

A atividade de mineração possui um grande potencial de impacto ambiental, uma vez que trabalha a extração de recursos minerais não renováveis em grandes extensões e que são essenciais no desenvolvimento de uma sociedade. Desta forma, é imprescindível o desenvolvimento de novas tecnologias, ou a efetiva aplicação das metodologias já disponíveis, para que os impactos sejam cada vez menores.

Nos processos de beneficiamento mineral a quantidade gerada de rejeitos e estéril é elevada, produzindo volumes consideráveis de material a ser estocado, comumente, em barragens e pilhas. A obtenção do Licenciamento Ambiental é obrigatória para instalação e operação de qualquer atividade de mineração, sendo cada vez mais requisitada a apresentação de projetos que considerem o mínimo de intervenção no cenário sócio-ambiental. Neste sentido, o backfill torna-se uma solução bem atrativa, haja visto que considera a ocupação de uma cava obtida na extração mineral com rejeitos e estéril provenientes do processo de beneficiamento. Soma-se a este fato a redução da probabilidade de grandes acidentes ambientais, uma vez que a maioria das cavas encontra-se limitada por corpos rochosos, reduzindo a susceptibilidade de ruptura quando comparados com os maciços de barragens construídos através da compactação de material argiloso.

Apresenta-se neste artigo considerações a respeito da viabilidade de utilização do backfill com a utilização de tubos de geotêxtil de alta resistência como técnica de disposição de rejeitos.

2 | TUBOS DE GEOTÊXTIL

Os materiais geotêxteis vêm sendo utilizados em obras de engenharia com funções de reforço, filtração, drenagem, separação e proteção. (PALMEIRA, 1993). O geotêxtil utilizado para fazer os tubos e sacos tem dimensões de poros finos, para permitir a retenção do enchimento, mas também tem uma elevada permeabilidade a fim de facilitar a saída da água durante a fase de enchimento hidráulico. Desse modo, o uso dos tubos de geotêxtil possibilitam a drenagem da fase líquida e retenção dos sólidos, com uma considerável redução do teor de umidade e consequente redução de volume já que essa drenagem também proporciona uma acomodação dos sólidos dentro do tubo, desidratando e consolidando o material em seu interior.

O geotêxtil tem alta resistência à tração para permitir-lhe resistir a tensões de tração que ocorre durante o enchimento hidráulico e manter a sua forma estrutural, além de ter uma resistência às sobrecargas, sem sofrer rasgamentos. (VIDAL, 2003). Por esta propriedade, podem ser empilhados, reduzindo o armazenamento dos rejeitos. Os tubos de geotêxtil de alta resistência são preenchidos por rejeito através do bombeamento hidráulico, resultando em uma estrutura monolítica, flexível e contínua, altamente resistente a correntes de água.

Os geotêxteis podem reter até 90% do material, dependendo da granulometria do material confinado. Caso haja uma alta quantidade de fração fina, essa retenção pode diminuir e o uso de floculantes pode ser especificado. Os materiais de granulometria fina trazem diversos aspectos desfavoráveis, tais como sua elevada capacidade de reter água, baixa resistência à tração, baixo ângulo de atrito e dificuldade no controle da migração de suas partículas; no entanto as frações finas não limitam seu uso como recheio dos tubos. (ORTIZ et al., 2003).

Os tubos de geotêxtil podem ser construídos de acordo com as necessidades de cada projeto, como visto na Figura 1. A seção transversal de um tubo cheio se aproxima de uma elipse, entretanto apresenta-se plana nas partes superior e inferior, sendo o perímetro múltiplo. Se resguardadas as condições técnicas de operação e instalação emitidas pelos fabricantes, bem como executados ensaios e acompanhamento de performance durante a vida útil do empreendimento, a expectativa de durabilidade deste tipo de material é similar aos demais materiais de construção. Os tubos são normalmente caracterizados em termos de diâmetro teórico após o enchimento, tendo como peças fundamentais para a operação:

- Tela Anti-Erosão na Base: geotêxtil tecido de elevada resistência, estendido abaixo do tubo abrangendo um ou ambos os lados, protegendo o solo de fundação da escavação gerada pelo fluxo que escapa de tubo;
- Prendedores: elementos que ficam ao longo da tela anti-erosão para assegurar a correta posição durante o enchimento e operação, feitos do mesmo geotêxtil da tela;
- Boca de Entrada do Fluxo: mangas de geotêxtil costuradas na parte superior do tubo, na qual é inserido o material de recheio. Quando o enchimento do tubo chega ao fim, elas são fechadas, costurando ou colando as pontas.

À medida que se podem acomodar tubos em cima de outro tubo com rejeitos consolidados, pode-se obter um material com alto peso específico natural, elevando a sua propriedade de receber tensões horizontais e conseqüentemente, contendo empuxos horizontais. Como o tubo é maleável e acomoda bem o material depositado, além de poder ser empilhado, é muito comum se dimensionar uma estrutura de contenção avaliando-se o momento em relação ao deslizamento e ao tombamento.



Figura 1. Empilhamento de Tubos têxtil em Salt Lake City (2009) – Maccaferri.

3 | ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado neste artigo é adaptado de um Projeto Básico real que, será tratado aqui por Projeto Bag.

As etapas do estudo contemplaram a análise de viabilidade locacional e das técnicas de disposição de rejeitos, com base nas premissas estabelecidas a seguir, objetivando a escolha da melhor alternativa.

- Produção total de rejeitos e estéril de 2.000Mm³, sendo 88% rejeitos e 12% estéril;
- Peso específico seco de rejeito é de 1,8t/m³ e do estéril 2,06t/m³;
- Sequenciamento de lavra por painéis;
- Rejeitos: mistura de lama argilosa composta por argilominerais (caulinitas) e quartzo;
- Teor de sólidos de 65% (adensado de 75%);
- Taxa de disposição de rejeitos de 10.000t/h;
- Vida útil do empreendimento de 30 anos;
- Percentual de recuperação de água de 80%;
- Região com registro de sismos.

O mergulho suave do corpo do minério e o método de lavra proposto permitia que grandes áreas já lavradas estivessem expostas, viabilizando a disposição de rejeitos e estéril dentro da cava. Há certa limitação nesta opção de disposição, se considerada a execução de barramentos convencionais, por ser requerida uma grande área para a execução dos diques de contenção em comparação com o volume de reservatório criado, bem como a complexidade em realizar compactação de aterro e impedir os processos de liquefação induzida pelas ondas de detonação.

Foram avaliadas quatro opções para disposição de rejeitos e estéril no sistema backfill, denominadas Opção A, B, C e D. As opções foram baseadas na otimização da máxima capacidade de reservação, dentro dos limites de estabilidade dos materiais.

Os rejeitos lançados em reservatório foram considerados pela possibilidade de lançamento de rejeitos e estéril nos reservatórios criados nas opções A, B e C. Esse tipo de técnica permite a recirculação da água armazenada para a planta de beneficiamento.

O aterro drenado não foi adotado como opção em função do tipo de material a ser produzido, pois é necessário que haja uma separação inicial do rejeito de forma a produzir frações de areia e lama, necessitando grandes porções de rejeito granular para a formação dos aterros, o que não é o caso.

Os rejeitos desaguados também não foram considerados pela característica topográfica da região, que não permite a configuração de uma pilha de proporções elevadas para atender os volumes produzidos na planta. Para os rejeitos espessados

e em pasta tem-se justificativa similar ao apresentado para o aterro drenado, sendo ainda necessário que o rejeito presente, no mínimo, 15% de material com granulometria abaixo de 0,020mm, o que não é o caso do material a ser produzido.

Os rejeitos acondicionados em diques de solo reforçado (Sistema Terramesh) foram adotados na Opção C para permitir a construção de diques expressivos dentro da cava, viabilizando o acondicionamento de grande porção de rejeitos e estéril no sistema “backfill”.

Os rejeitos acondicionados em tubos de geotêxtil de alta resistência foram considerados nas Opções B, C e D, por viabilizar o empilhamento de material em áreas com restrição topográfica e de restrição a movimentação operacional, como a cava, e alteamentos expressivos sobre praias formadas por rejeito. Este tipo de técnica permite obter maiores alturas de empilhamento e ocupação, absorvendo maiores volumes de rejeitos e estéril e sendo uma opção com características de resistência superior as demais.

O consumo de material entre os tubos pode ser entendido como a disposição de estéril, geogrelhas, geotêxtil, ou a combinação destes materiais, dentre outros.

3.1 Análises de estabilidade

Com o objetivo de validar a estabilidade das opções apresentadas, foram realizadas análises de estabilidade nas seções típicas de cada opção, considerando análises dinâmicas e estáticas, uma vez que a região do empreendimento apresentava atividade sísmica e deveriam ser considerados os efeitos da vibração em decorrência das detonações.

Para simular esta condição dinâmica foi realizada uma análise pseudo-estática, a partir do valor de aceleração máxima, estimando-se o valor da força estática que representa o efeito da atividade sísmica. Foi adotado o valor de aceleração máxima na base do terreno de 0,15g, valor este extraído de “Estudo dos Tremores de Terra – 2012 – USP/UNB” e sabendo-se que o valor da aceleração da gravidade (g) é de 9,789m/s². Esse valor de aceleração máxima foi convertido para uma força horizontal estática que equivale à metade desta intensidade, portanto 0,075g. Para os efeitos da detonação, a força horizontal estática é da ordem de 0,050g.

Nas análises foi considerado que os efeitos da detonação seriam controlados e, desta forma, foram desconsiderados. Entretanto, foi admitido que os dois fenômenos, sismicidade e detonação, não ocorrem simultaneamente e, sendo assim, ao admitir somente os efeitos de sismicidade tem-se uma análise mais conservadora, uma vez que o valor da força horizontal estática de sismicidade é superior ao valor da força horizontal estática de detonação.

Para as análises estáticas foram considerados os critérios de aceitação segundo norma ABNT NBR 13028 - 2006 - Barragem de rejeitos e sedimentos, sendo:

- Ruptura do talude geral de jusante, com superfície freática normal - F.S. mín= 1,50;

- FS mínimo aceitável nas análises pseudo-estática é de 1,10.

As análises de estabilidade consideraram a freática passando pelo sistema de drenagem interna da estrutura (maciço e diques) e não foi considerado o comprimento mínimo de praia no caso dos alteamentos a montante.

Em função de não terem sido realizados estudos geotécnicos dos materiais, estimou-se as propriedades necessárias para a análise de estabilidade com base na literatura de materiais similares e projetos semelhantes, conforme apresentado na Tabela 1.

As análises de estabilidade foram realizadas com o Software SLIDE/Rocscience Versão 6.0 e o método de cálculo utilizado foi o de Bishop Simplificado. Parte dos resultados obtidos nas análises realizadas encontram-se resumidos na Tabela 2.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)		f' (°)	
		Normal	Anisotropia		
			C1		C2
Rejeito	23	7		32	
Fundação*	33		50	450	28
Rejeito adensado	23	10			35
Gabião	22	35		33	
Aterro	20	18		28	

Tabela 1. Propriedades geotécnicas dos materiais.

*Ângulo de foliação 11H

Opção	Condição	F.S Obtido
A	Normal - El. 745,0	2,40
	Sismo - El. 745,0	1,90
B	Normal - El. 816,0	2,69
	Sismo - El. 816,0	1,56
C	Fase Inicial - Normal - El. 819,0	1,52
	Fase Inicial - Sismo - El. 819,0	1,16
	Fase Final - Normal - El. 819,0	1,57
	Fase Final - Sismo - El. 819,0	1,14
D	Normal - El. 1.072,0	1,52
	Sismo - El. 1.072,0	1,20

Tabela 2. Resultados das análises de estabilidade.

3.2 Estudo de opções

Para as opções apresentadas foram consideradas as elevações e os volumes armazenados ao final de cada ano, apresentando uma estimativa de vida útil que leva em conta os volumes de produção e, considerando ser o único sistema de disposição em operação, ou seja, a vida útil considerando as produções de estéril

e rejeito sendo lançadas unicamente em cada arranjo, a partir do primeiro ano. Considerou-se a disposição de rejeito da crista para jusante do reservatório, para que o armazenamento de água fosse a jusante do reservatório, minimizando a saturação das estruturas.

3.2.1 Opção A

A opção A considerou a ocupação da cava através da execução de septos em rocha para barramento de estéril e rejeito (Fase Inicial) juntamente com a disposição de rejeito nos tubos com seções intermediárias de estéril (Fase Final). Esta opção foi elaborada respeitando o sequenciamento do plano de lavra e das escavações, ou seja, sem alterar o plano de lavra, apenas interrompendo a escavação em pontos específicos para a conformação dos septos. Assim, o rejeito e estéril seriam armazenados em reservatórios contidos pelos septos, constituídos pelo próprio maciço rochoso “in situ”. Os septos teriam elevação contínua em relação a extensão, sendo a cota da crista igual a cota de sela topográfica para cada dique. Ao todo, considerou-se 05 reservatórios a serem construídos nos anos 2, 5, 10, 20 e 25. Após o preenchimento destes reservatórios, haveria a disposição de rejeito através do empilhamento de tubos sobre a área formada pelo reservatório, com seções intermediárias preenchidas por estéril. No Ano 25, a elevação da crista do septo seria 745,0m (Fase Inicial) e, no Ano 27, os tubos de geotêxtil estariam na elevação 775,0m (Fase Final).

Os septos possuíam inclinação de 0,2H:1,0V, sendo que o talude de jusante apresentaria alturas variando de 35,0m a 90,0m, sem bermas de equilíbrio e com largura da crista de 6,0m. Já os tubos seriam empilhados em pirâmide, com inclinação de 3,0H:1,0V com dimensões de 2,2 x 17,0 x 65,0m, sendo altura, comprimento e largura, conforme apresentado na Figura 2.

Apesar dos septos serem constituídos por maciço rochoso pouco alterado e de boa resistência (Classe II), considerou-se a foliação mergulhando para jusante, isto é, favorável à instabilidade, e que somado à grande altura dos diques, poderia requerer o dimensionamento de reforços (bermas de estabilização, tirantes) para evitar qualquer tipo de ruptura, em atendimento aos critérios de estabilidade preconizados na Norma ABNT NBR 11682.

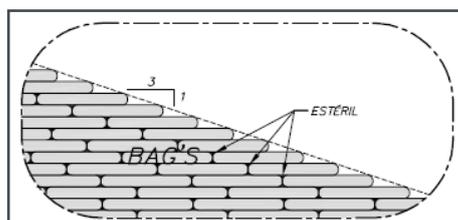


Figura 2. Empilhamento dos tubos.

Em função da preservação deste septo não escavado, o volume de material não lavrado foi expressivo, gerando um menor percentual de minério e, conseqüentemente, um menor percentual de rejeito e estéril. A estimativa de estéril e rejeito que não seriam produzidos é baseada em um percentual de 18% de minério relacionado com cada perda de minério no septo. Ao final do Ano 25 a perda de minério seria da ordem de 10,72Mt, com uma estimativa de rejeito e estéril não gerado de 48,82Mt.

A Figura 3 apresenta uma seção típica da Fase Final para a Opção A.

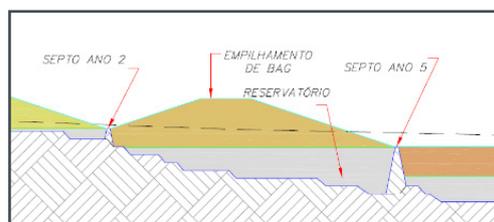


Figura 3. Seção Típica da Opção A.

3.2.2 Opção B

A Opção B considerou a ocupação da cava através do empilhamento de tubos de geotêxtil preenchidos por rejeito sobre a área formada pela lavra, com seções intermediárias preenchidas por estéril. O preenchimento dos tubos seria feito de jusante para montante, para que fosse aproveitada a drenagem a ser efetuada em cada etapa do empilhamento, com um volume de rejeito por tubo de 1945m³. A Figura 4 apresenta a seção típica para esta Opção.

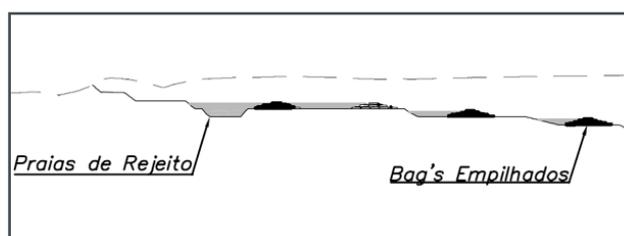


Figura 4. Seção Típica da Opção B.

O desnível no interior da cava é da ordem de 360,0m e os tubos deveriam ser dispostos em seções aparentemente planas, seguindo as delimitações do plano de lavra ano a ano e sem retomada da lavra para áreas onde o tubo já estivesse sido implementado. Por esta razão, a disposição nesta opção apresentou restrições de área, sendo o maior aproveitamento no Ano 30 (Elevação 816,0m), quando todo o processo de lavra estivesse finalizado e não havendo mais material para a disposição.

A Figura 5 apresenta uma seção típica do empilhamento dos tubos dentro da cava, sendo o consumo total de estéril entre os tubos de 688.532m³.

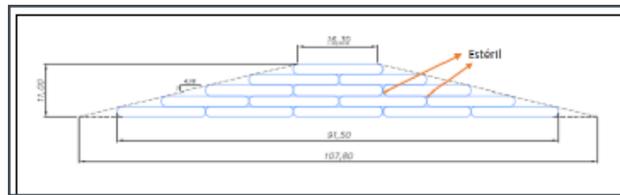


Figura 5. Seção típica empilhamento tubos – Opção B.

3.2.3 Opção C

A Opção C considerou a ocupação da cava através da execução de diques em solo reforçado (terramesh) para barramento de estéril e rejeito (Fase Inicial) juntamente com a disposição de rejeito em tubos com seções intermediárias de estéril (Fase Final). Desta forma, o rejeito e estéril seriam armazenados em reservatórios contidos por diques em terramesh, constituídos pelo estéril e rejeito. A elevação dos diques e os anos de construção são os mesmos considerados para a Opção A.

Os diques em solo reforçado apresentavam geometria piramidal, simétrica nos eixos, formando 4 bancos. Os dois primeiros bancos apoiados na base seriam formados por proteção superficial com gabiões de espessura 2,0m e reforço do solo em tiras metálicas; já os dois bancos superiores seriam constituídos de solo envelopado. A altura típica dos dois primeiros bancos era de 25,0m, enquanto que a altura típica dos bancos superiores era de 20,0m, sendo que todos os platôs com comprimento de 15,0m. Os taludes superiores possuíam inclinação de 1,0H:1,8V, formando 30° entre sua face e a parede vertical, tendo a crista largura de 6,0m. A altura da estrutura era variável, bem como sua inclinação global. A geometria e empilhamento dos tubos segue a mesma definição da Opção A. A Figura 6 apresenta a geometria esquemática de um dos diques em terramesh e a Figura 7 a uma seção típica da Opção C.

No Ano 25 a elevação da crista do dique da Fase Inicial seria de 745,0m e dos tubos de geotêxtil na Fase Final, 770,0m.

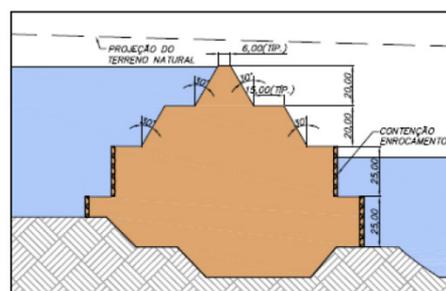


Figura 6. Geometria esquemática diques em terramesh.

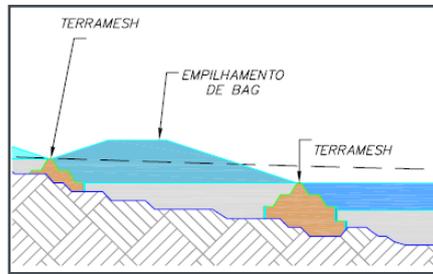


Figura 7. Seção Típica da Opção C.

3.2.4 Opção D

A Opção D considerou a ocupação de toda a cava através do empilhamento de tubos preenchidos por rejeito sobre a área formada pela lavra, com seções intermediárias preenchidas por estéril. Esta opção considerou que o preenchimento seria feito de jusante para montante, para que fosse aproveitada a drenagem a ser efetuada para cada etapa do empilhamento, conforme apresentado na Figura 8. A quantidade total de tubos seria de 464.000 unidades, até o final do Ano 25.

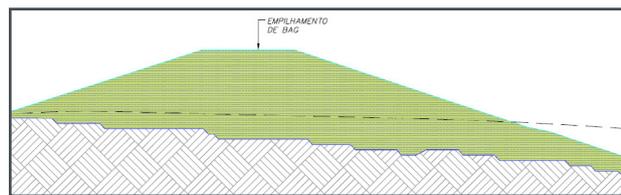


Figura 8. Seção típica da Opção D.

3.3 Características dos Geossintéticos

O tubo geotêxtil considerado nos estudos é do tipo geotêxtil não-tecido, 100% poliéster N40.2, consolidado por agulhamento. A Tabela 3 apresenta as características deste material.

Para estudos de adensamento e filtração, a Maccaferri produziu um protótipo de tubo, em escala reduzida, com dimensões de 1,8 x 1,0 x 1,0, sendo altura, comprimento e largura. A altura do tubo para enchimento foi mantida sem redução, para que não houvesse divergência em relação às considerações do adensamento hidráulico ocasionado pelo lançamento dos rejeitos no tubo.

Resistência longitudinal à tração	10 kNm
Resistência transversal à tração	9 kN/m
Alongamento	50%
Resistência punção CBR	1,7 kN
Permissividade	2,0 s-1
Abertura aparente	0,212mm
Embalagem	Bobinas

Tabela 3. Características do Tubo de Geotêxtil.

Para avaliar a eficiência de filtração com a adição de flocculantes, utilizou-se o Magnafloc10, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4 e Figura 9.

Concentração utilizada	0,25 - 0,5% max
Forma física	Pó granular branco
Tamanho das partículas	98% < 100 µm
Densidade aparente	0,7 g/cm ³
PH - 1% de solução a 25°C	6,5
Viscosidade a 25°C	Ver Figura 4.16

Tabela 4. Características do Flocculante.

Fonte: BASF

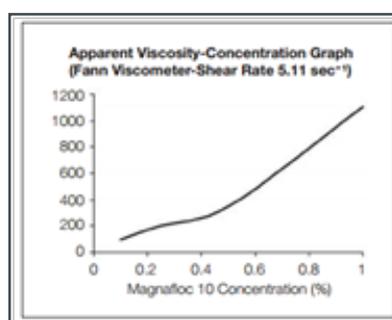


Figura 9. Viscosidade X Concentração (Fonte: BASF).

A concentração utilizada foi escolhida após testes de dispersão indicarem o tipo de flocculante mais eficiente para o rejeito considerado, como pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10. Testes de dispersão.

Para a verificação das propriedades de filtração do tubo e do adensamento dos rejeitos, foram realizadas dois tipos de análise, sendo o enchimento sem flocculante denominado por Ensaio AA e com flocculante por Ensaio BB.

Em ambos os casos, os tubos foram submetidos a mesma altura de lançamento de rejeitos, através de um tubo de PVC, sendo acomodados sobre uma plataforma que permitia a coleta do material drenado, imediatamente após o lançamento de rejeitos, como pode ser visto na Figura 11. Também foram submetidos ao mesmo

processo de mistura e agitação, antes do lançamento, sendo que a Figura 12 apresenta os resultados obtidos na filtração do material. Nota-se que, visualmente, a filtração do Ensaio BB ocorreu de forma mais eficiente do que no Ensaio AA, sendo que ambos os ensaios tiveram as amostras de água coletadas imediatamente após o lançamento de rejeitos. A Tabela 5 apresenta um comparativo dos valores de turbidez e cor obtidos na análise da água coletada após a filtração, com uma coluna comparativa com os valores recomendados de potabilidade.



Figura 11. Preenchimento do Tubo de Geotêxtil.



Figura 12. Filtração do Ensaio AA e BB.

	Ensaio AA	Ensaio BB	Padrão Potabilidade
Turbidez (UNT)	40	15	< 0,5 a 5
Cor (mg Pt/l)	50	30	até 20
Volume coletado (ml) após 1 hora	375	700	

Tabela 5. Resultados da filtração.

Após o período de 3 semanas, os tubos foram abertos para verificação da condição de adensamento, sem floculante e com floculante, conforme pode ser visualizado na Figura 13.



Figura 13. Adensamento Ensaio AA e BB.

3.4 Estudos Econômicos

Com o objetivo de avaliar o custo de implantação das opções avaliadas, juntamente com a viabilidade técnica e operacional das mesmas, apresenta-se na Tabela 6 os valores de Capex, Sustaining Capex (Estrutura e Bombeamento) e Opex, bem como os valores aproximados de por m³ de material depositado.

O Capex refere-se aos custos relativos aos primeiros anos de implantação (Fase Inicial), sendo o Sustaining Capex referente aos demais custos até a Fase Final. Os valores de Opex referem-se a todos os custos operacionais por opção. Para a Opção A, B e D, considerou-se os custos de aquisição dos tubos e execução do volume de concreto do sistema extravasor e de drenagem superficial. O mesmo foi considerado para a Opção C, com a inclusão dos custos do Sistema Terramesh. Os valores considerados são baseados em cotações e análises de custo realizadas em 2013, sendo:

- Custo unitário tubo = R\$ 50.000,00
- Custo m³ do Sistema Terramesh= R\$ 30,35
- Custo do m³ de concreto = R\$ 344,00
- Custo de operação por tonelada de rejeito é de US\$ 0,045
- Custo total considera 8% de mobilização, desmobilização e canteiro de obras e 5% para regularizações, instrumentação e outros.

OPÇÃO	CAPEX R\$	SUSTAINING CAPEX	OPEX
A	36.825	4.553.236.800	4.943.896
B	178.382.765	142.884.000	4.943.896
C	991.806.521	6.678.000.486	4.943.896
D	4.209.431.593	16.837.726.372	4.943.896

Tabela 6. Custo de implantação e operação.

4 | COMENTÁRIOS FINAIS

Após a abertura dos tubos foi possível identificar a eficiência do adensamento no uso do floculante, o que está em consonância com os valores apresentados de turbidez e cor da água filtrada, bem como da quantidade de água coletada.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos volumes acumulados em cada Opção.

Opção	Volume Reservatório	Volume Tubos Mm3	Volume Total	Vida útil (anos)
A	266	191	457	6,7
B	602	14	616	9,0
C	333	188	521	7,6
D		1102	1102	16,2

Tabela 7. Volumes armazenados por Opção.

Para a Opção A tem-se um volume total de disposição de cerca de 457Mm3 de rejeitos e estéril, distribuídos ao longo dos anos de exploração da cava, com a vantagem principal de ser possível reservar material com contenções em rocha bem estáveis e esbeltas, contornando os possíveis efeitos da liquefação no reservatório. A principal desvantagem é referente ao percentual de minério que deixará de ser lavrado para a construção dos septos.

Para a Opção B tem-se um volume total de disposição de cerca de 616Mm3 de rejeitos e estéril, entretanto, o maior volume de reservação acontece somente no Ano 30, com cerca de 580Mm3, tornando a alternativa inviável pelo fato da produção não acompanhar estes volumes disponíveis para reservação em função da geração de estéril e rejeito ano a ano.

Para a Opção C tem-se um volume total de disposição de cerca de 521Mm3 de rejeitos e estéril, distribuídos ao longo dos anos de exploração da cava. A principal vantagem desta opção em relação à Opção A deve-se ao fato do volume armazenado ser superior, sem a perda da reserva mineral, sendo possível o reaproveitamento das estruturas de geotêxtil para a cobertura do fechamento da estrutura após o encerramento das operações de lavra.

Para a Opção D tem-se um volume total de disposição de cerca de 1.102Mm3 de rejeitos e estéril, distribuídos ao longo dos anos de exploração da cava. A principal desvantagem desta opção deve-se ao fato de requerer ajustes no plano de lavra, ao longo da exploração, para que a acomodação dos tubos de geotêxtil fosse efetuada em áreas planas. Desta forma, haveriam períodos frequentes de paralisação de operação para execução destes platôs, comprometendo os processos de produção.

No que diz respeito aos custos de implantação e operação (R\$/m3) tem-se que a Opção B é a mais atrativa, seguida da Opção A, conforme apresentado na Tabela

8.

OPÇÃO	TOTAL (R\$)	Volume (Mm3)	R\$ /m3
A	4.558.217.521	457	9,97
B	326.210.661	616	0,53
C	7.674.750.904	521	14,74
D	21.052.101.861	1.102	19,10

Tabela 8. Relação custo x armazenamento.

Entretanto, em função das desvantagens técnicas consideradas anteriormente, podemos dizer as Opções A, B e D não possuem a melhor relação custo x benefício para o Projeto Bag.

Sendo assim, diante dos estudos realizados, e levando em consideração a necessidade de criar a maior reservação de rejeitos e estéril, em uma condição aceitável de estabilidade, em conformidade com a geração de rejeitos e estéril ano a ano, conclui-se que a Opção C foi a melhor escolha neste caso. Nesta opção, a combinação dos tubos de geotêxtil com o terramesh permitiu uma melhor acomodação dos rejeitos e estéril gerados, facilitando o gerenciamento e implantação das estruturas, redução progressiva dos passivos ambientais, comprometimento com o plano de fechamento das estruturas, facilidade de controle e mitigação de eventuais problemas e acurácia nos custos envolvidos de projeto e operação.

AGRADECIMENTOS

A autora expressa sua gratidão à empresa Maccaferri do Brasil pela colaboração no desenvolvimento do Projeto Bag e da realização deste artigo. Especial agradecimento à Professora Maria das Graças Gardoni Almeida pelo constante incentivo para realização de pesquisas e publicação dos estudos.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11682: Estabilidade de Taludes – Rio de Janeiro, 1991.

Ortiz, R. N.; Junior, O. S.; Ladchumanandasivam, R. Tubos de Geotêxtil Aplicados a Obras de Defesa Costeira, II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de expressão Portuguesa, 2003.

Palmeira, E.M. (1993) Curso de Estabilização e Reforço de Solos Introdução à Utilização de Geossintéticos, Publicação GAPOO2B/93, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade

de Brasília, DF.

Vidal, D. (2003) Aplicações especiais e controle de erosão, Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Porto Alegre, IGS, maio, pp.131-148.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise numérica 130

Arenito 35, 37, 119, 120, 121, 122, 125, 128

Aterro 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 39, 47, 49, 50, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 65, 66, 67, 84, 88, 145, 146, 151, 153, 154, 155

B

Backfill 62, 63, 65, 66

Barragem 66, 105, 106, 107, 108, 112, 114, 116

C

CCP 38, 39, 40, 41, 42, 48

Cepilhamento 38, 39, 41, 42, 46, 48

Colunas de brita 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 60, 61

Compressão simples 1, 4, 7, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 37, 116

D

Deslizamento 64, 79, 80, 91, 92, 93, 98, 104

Disposição de rejeitos 62, 63, 65

Drenos fibroquímicos 50, 51, 52, 53, 55, 57, 58, 59

E

Embutimento em rocha 139, 141

Encostas urbanas 91

Ensaio 1, 7, 9, 13, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 56, 60, 64, 73, 105, 106, 107, 108, 109, 113, 114, 115, 116, 118, 120, 121, 122, 124, 125, 128, 133, 145, 148, 149, 150, 151, 152, 154

Estabilização 4, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 46, 48, 52, 58, 59, 68, 76, 78, 83, 84, 85, 144, 150

Estabilização de encostas 78, 83, 85

Estacas 86, 87, 88, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142

F

Formação Chicontepec 119, 120, 121

Formação Santos 119, 121, 122, 123, 124, 126, 127, 128

I

Implantação 3, 39, 52, 57, 59, 60, 74, 75, 76, 85, 91, 93, 105, 112, 155

Investigações geológicas-geotécnicas 105

M

Material pétreo 14, 116

Mistura asfáltica 14, 20

O

Ocupação antrópica de encostas 78

P

Pavimentação 5, 26, 27, 30, 32, 35, 36, 37, 58, 59, 155

Poliestireno expandido (EPS) 1, 2

R

Radier estaqueado 130, 131, 134, 136, 137, 139, 142

Recalque 12, 47, 50, 51, 57, 58, 59, 130, 131, 134, 136, 139, 140, 141, 142, 148

Rejeitos de mineração 62

Reservatório arenítico turbidítico 119

Resíduo 17, 21, 22, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48

Resíduos cerâmicos 14, 16, 20, 21

Resíduos de construção e demolição 14, 16, 25

Resistência à compressão simples 26, 27, 29, 30, 33, 35, 36, 116

Resistência à compressão uniaxial 109, 118, 119, 120, 125, 128, 132, 133

Risco geológico 78, 81, 82, 83, 92, 96, 98

S

Solo 3, 5, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 64, 66, 70, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 93, 94, 105, 108, 109, 112, 113, 114, 116, 130, 131, 134, 135, 136, 137, 139, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155

Solo-cal 26, 27, 28, 29, 33, 35, 36

Solos moles 1, 2, 3, 13, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 59, 60, 61, 144, 145, 147, 148, 151, 153, 154, 155

Stone Matrix Asphalt 14, 15, 16, 25

T

Tubos de geotêxteis 62

Z

Zoneamento de risco 91, 92, 98

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-7247-746-8



9 788572 477468