

BETHANIA CARLA FERNANDES

**MISTURAS DE BENTONITA COM UM SOLO TROPICAL E COM REJEITO DE
MINERAÇÃO PARA BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERROS
SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Coorientador: Roberto Lopes Ferraz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F363m
2021

Fernandes, Bethania Carla, 1995-
Misturas de bentonita com um solo tropical e com rejeito de
mineração para barreiras impermeabilizantes de aterros
sanitários / Bethania Carla Fernandes. – Viçosa, MG, 2021.
85 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 78-85.

1. Impermeabilização. 2. Solos. 3. Bentonita. 4. Rejeitos
(Metalurgia). 5. Aterro sanitário. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB6 2523

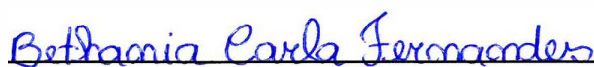
BETHANIA CARLA FERNANDES

**MISTURAS DE BENTONITA COM UM SOLO TROPICAL E COM REJEITO DE
MINERAÇÃO PARA BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES DE ATERROS
SANITÁRIOS**

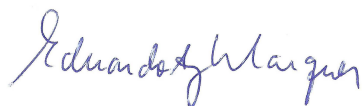
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de julho de 2021.

Assentimento:



Bethania Carla Fernandes
Autora



Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

*Dedico este trabalho aos
meus pais, Nadir e Ivone,
e ao meu irmão, Allan.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades e bênçãos que são colocadas na minha vida.

Aos meus pais Nadir e Ivone, por todo apoio e carinho demonstrado ao longo dessa caminhada, sempre torcendo pelo meu sucesso.

Ao meu irmão Allan, pelo incentivo e companheirismo.

Ao meu orientador Professor Dr. Eduardo Antonio Gomes Marques, pela confiança e disponibilidade.

Ao meu coorientador Professor Dr. Roberto Lopes Ferraz, pelas sugestões, ensinamentos, disponibilidade e auxílio na condução desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da UFV pela solicitude e ajuda na realização dos ensaios.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

FERNANDES, Bethania Carla, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Misturas de bentonita com um solo tropical e com rejeito de mineração para barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Roberto Lopes Ferraz.

O intuito da presente pesquisa foi avaliar o potencial de aplicação de misturas de bentonita com um solo tropical e com um rejeito de mineração, para uso como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. Para tal, desenvolveu-se um programa experimental de forma a analisar o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais em seu estado puro (sem aditivo) e em misturas com 2%, 4%, 6% e 8% de bentonita, em termos de massa seca do material. Nos materiais no estado puro e suas misturas foram realizados ensaios de compactação na energia Proctor Normal, de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível, triaxiais adensados e não drenados (CIU) e de adensamento com deformação controlada (CRS). As curvas de compactação mostraram que, tanto para as misturas de solo tropical-bentonita como de rejeito-bentonita, houve um aumento no teor de umidade ótimo e uma redução no peso específico seco máximo, conforme o aumento no teor de bentonita. Os valores de condutividade hidráulica indicaram uma diminuição com o acréscimo de bentonita, tanto para o solo quanto para o rejeito. Observou-se que, com o aumento da tensão de adensamento dos corpos de prova, houve redução na condutividade hidráulica, tanto para as misturas solo-bentonita como rejeito-bentonita. Com relação ao solo, o teor de 8% de bentonita reduziu sua permeabilidade para valores aceitáveis para revestimento de fundo de aterros sanitários. Já para as misturas de rejeito-bentonita, os resultados indicaram uma redução da permeabilidade com a adição de bentonita. Contudo, mesmo o maior teor de bentonita utilizado (8%) não resultou em redução da permeabilidade para os valores recomendados. Em relação à resistência ao cisalhamento, constatou-se que, tanto para as misturas solo-bentonita como rejeito-bentonita, houve, no geral, uma redução desta com o aumento no teor de bentonita. A compressibilidade do solo tropical aumentou com o acréscimo de bentonita. Já para o rejeito, somente foram constatados aumentos na compressibilidade para as misturas com 4% e 6% de bentonita, sendo observada uma ligeira redução na mistura com 8% de bentonita.

Palavras-chave: Solo-bentonita. Rejeito-bentonita. Impermeabilização. Aterros sanitários.

ABSTRACT

FERNANDES, Bethania Carla, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021. **Mixtures of bentonite with tropical soil and mining tailings for sanitary landfill liners.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Roberto Lopes Ferraz.

The intent of this research was to evaluate the potential of application of bentonite mixtures with a tropical soil and with a mining tailings, for use as sanitary landfill liners. For this, an experimental program was developed in order to analyze the mechanical and hydraulic behavior of the materials in pure state (no additive) and in mixtures of 2%, 4%, 6% and 8% of bentonite, in terms of the dry mass of the material. In the pure state materials and their mixtures, compaction tests were performed using Proctor Normal energy, hydraulic conductivity in a flexible wall permeameter, consolidated undrained triaxial tests (CIU) and constant rate-of-strain tests (CRS). The compaction curves showed that, for both tropical soil-bentonite and tailings-bentonite mixtures, there was an increase in the optimum moisture content and a reduction in the maximum dry specific weight, according to the increase in bentonite content. The hydraulic conductivity values indicated a decrease with the addition of bentonite, both for the soil and for the tailings. With the increase in the values of consolidation stresses, it was observed that there was a reduction in hydraulic conductivity for both soil-bentonite and tailings-bentonite mixtures. Regarding the soil, the 8% content of bentonite reduced its permeability to acceptable values for sanitary landfill liner. For the tailings-bentonite mixtures, the results indicated a reduction in permeability with the addition of bentonite. However, these results indicated that even the highest content of bentonite used (8%) did not reduce the permeability to recommended values. Regarding shear strength, it was found that, for both soil-bentonite and tailings-bentonite mixtures, there was, in general, a reduction as the bentonite content increased. The compressibility of the tropical soil increased with the addition of bentonite. As for the tailings, there were only increases in compressibility for the mixtures with 4% and 6% of bentonite, with a slight reduction being observed in the mixture with 8% of bentonite.

Keywords: Soil-bentonite. Tailings-bentonite. Impermeabilization. Sanitary landfills.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema ilustrativo do revestimento de fundo.	20
Figura 2: (a) barreira simples de solo compactado e barreiras compostas de (b) geomembrana e solo compactado e (c) geomembrana, geocomposto argiloso e solo compactado.....	21
Figura 3: Estrutura cristalina da montmorilonita.....	24
Figura 4: Efeito do teor de bentonita na condutividade hidráulica.	32
Figura 5: Vista do talude e do local de coleta das amostras de solo.....	39
Figura 6: Detalhe da aparelhagem e da moldagem dos CPs.....	43
Figura 7: Detalhe da execução de um ensaio de compressão triaxial.	45
Figura 8: Detalhe da aparelhagem utilizada para a moldagem dos CPs para o ensaio CRS.	46
Figura 9: Detalhes da colocação do material no molde e posicionamento do pistão metálico para compressão.	47
Figura 10: Compressão e montagem do CP na célula do ensaio CRS.	47
Figura 11: Detalhe da célula CRS após colocação na prensa e preparativos para a execução do ensaio.	48
Figura 12: Curvas granulométricas dos materiais.	49
Figura 13: Resultado da difração de raios-X do solo.	51
Figura 14: Resultado da difração de raios-X da bentonita.	51
Figura 15: Resultado da difração de raios-X do rejeito de minério de ferro.	52
Figura 16: Curvas de compactação do solo e das misturas com bentonita.....	53
Figura 17: Coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão.	54
Figura 18: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo puro.	55
Figura 19: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 2% de bentonita.	56
Figura 20: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 4% de bentonita.	56
Figura 21: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 6% de bentonita.	57
Figura 22: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 8% de bentonita.	57

Figura 23: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do solo puro e misturas.	58
Figura 24: Detalhe das envoltórias em termos de tensões efetivas para baixos níveis de tensões.	59
Figura 25: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do solo puro e misturas.	59
Figura 26: Variação da razão R_u (u_b/σ_v) com a tensão vertical efetiva nos ensaios CRS com o solo e misturas.	60
Figura 27: Curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva no ensaio CRS.....	61
Figura 28: Curvas de variação da relação e/e_0 com a tensão vertical efetiva.....	61
Figura 29: Coeficiente de permeabilidade em função do índice de vazios no ensaio CRS.	62
Figura 30: Coeficiente de adensamento (c_v) em função da tensão vertical efetiva no ensaio CRS.....	63
Figura 31: Curvas de compactação do rejeito e das misturas com bentonita.....	64
Figura 32: Coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão.	65
Figura 33: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito puro.....	66
Figura 34: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 2% de bentonita.	66
Figura 35: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 4% de bentonita.	67
Figura 36: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 6% de bentonita.	67
Figura 37: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 8% de bentonita.	68
Figura 38: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do rejeito puro e misturas.	69
Figura 39: Detalhe das envoltórias em termos de tensões efetivas para baixos níveis de tensões.	69
Figura 40: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do rejeito puro e misturas.	70

Figura 41: Variação da razão R_u (u_b/σ_v) com a tensão vertical efetiva nos ensaios CRS com o rejeito e misturas.....	71
Figura 42: Curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva no ensaio CRS.....	72
Figura 43: Curvas de variação da relação e/e_0 com a tensão vertical efetiva.....	72
Figura 44: Coeficiente de permeabilidade em função do índice de vazios no ensaio CRS.	73
Figura 45: Coeficiente de adensamento (c_v) em função da tensão vertical efetiva no ensaio CRS.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da bentonita.....	40
Tabela 2: Ensaio de caracterização geotécnica do solo.	41
Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais.	49
Tabela 4: Parâmetros referentes à classificação geotécnica MCT.	50
Tabela 5: Parâmetros de compactação do solo e das misturas com bentonita.	53
Tabela 6: Coeficiente de permeabilidade (cm/s) em função do teor de bentonita e do nível de tensão.	54
Tabela 7: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do solo puro e misturas.	58
Tabela 8: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do solo puro e misturas.	59
Tabela 9: Parâmetros de compactação do rejeito e das misturas com bentonita.	64
Tabela 10: Coeficiente de permeabilidade (cm/s) em função do teor de bentonita e do nível de tensão.	65
Tabela 11: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do rejeito puro e misturas.	68
Tabela 12: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do rejeito puro e misturas.	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Resíduos sólidos	17
2.2	Aterros sanitários.....	18
2.3	Impermeabilização de fundo de aterros sanitários	19
2.4	Bentonita	23
2.5	Solos tropicais	25
2.5.1	Microestrutura e mineralogia.....	26
2.5.2	Comportamento do solo tropical em aterros sanitários.....	27
2.6	Resíduos em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários	28
2.6.1	Rejeito de mineração.....	29
2.7	Emprego da bentonita em solos e resíduos	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais.....	39
3.1.1	Solo	39
3.1.2	Rejeito	40
3.1.3	Bentonita.....	40
3.1.4	Misturas solo-bentonita e rejeito-bentonita	40
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	Caracterização geotécnica e mineralógica	41
3.2.2	Compactação das misturas.....	42
3.2.3	Ensaio de condutividade hidráulica.....	42
3.2.4	Ensaio de compressão triaxial	44

3.2.5	Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS).....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Caracterização dos materiais de estudo.....	49
4.2	Ensaio com o solo puro e suas misturas com bentonita.....	52
4.2.1	Ensaio de compactação (Solo-Bentonita).....	52
4.2.2	Ensaio de condutividade hidráulica (Solo-Bentonita).....	53
4.2.3	Ensaio de resistência ao cisalhamento (Solo-Bentonita).....	55
4.2.4	Ensaio de adensamento CRS (Solo-Bentonita).....	60
4.3	Ensaio com o rejeito puro e suas misturas com bentonita	63
4.3.1	Ensaio de compactação (Rejeito-Bentonita)	63
4.3.2	Ensaio de condutividade hidráulica (Rejeito-Bentonita).....	64
4.3.3	Ensaio de resistência ao cisalhamento (Rejeito-Bentonita)	65
4.3.4	Ensaio de adensamento CRS (Rejeito-Bentonita).....	71
5	CONCLUSÕES	75
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, devido ao crescimento populacional e à expansão industrial, sérios problemas têm sido causados, como a geração de resíduos contaminantes e o seu consequente descarte inseguro. A decomposição de resíduos sólidos é responsável pela produção de gases e líquidos, os quais podem causar a contaminação do solo e das águas subterrâneas, causando sérios danos ao meio ambiente. Dessa forma, diversos pesquisadores (ANIEKAN; EBUNILO; OKOVIDO, 2018; BUDIHardJO *et al.*, 2019; CAMARGO; SILVA; BASTOS, 2012; CHERIYAN e CHANDRAKARAN, 2020; CORREIA; CALDAS; OLUREMI, 2020; GUIMARÃES; BENATTI; FERREIRA, 2020; LUKIANTCHUKI e ESQUIVEL, 2010; MORANDINI e LEITE, 2015; MORANDINI e SCHNEIDER, 2017; RAMADAM *et al.*, 2021), têm se dedicado à questão da destinação final adequada dos resíduos.

A geração e a eliminação dos resíduos sólidos são alguns dos principais fatores que atormentam a saúde pública e o meio ambiente nos últimos tempos, e isso levou ao desenvolvimento de vários sistemas de gestão de resíduos. Um dos métodos mais seguros para disposição e tratamento dos resíduos sólidos é o aterro sanitário, o qual ainda é considerado um método de disposição adequado tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental (ANIEKAN; EBUNILO; OKOVIDO, 2018; BUDIHardJO *et al.*, 2019; OLAOYE *et al.*, 2019; ROUT e SINGH, 2020).

O desempenho adequado dos aterros sanitários se deve em grande parte à eficiência das barreiras impermeabilizantes de fundo utilizadas na fundação do aterro, visto que uma das grandes preocupações na construção de um aterro sanitário é a contaminação do solo e cursos d'água pelo lixiviado nas proximidades do aterro. Com isso, é importante que a camada de base do aterro retenha ou minimize o escoamento de lixiviado, no intuito de evitar a percolação de contaminantes (GUIMARÃES; BENATTI; FERREIRA, 2020).

As barreiras impermeabilizantes geralmente são constituídas por solos compactados. Um solo é considerado praticamente impermeável e, portanto, adequado para ser aplicado como barreira impermeabilizante, quando sua condutividade hidráulica for inferior a 10^{-7} cm/s (NAMBIAR; REMYA; VARGHESE, 2019; OPAFOLA *et al.*, 2020; POTTER e YONG, 1995; USEPA, 1989).

Ao longo dos anos, diversas combinações de materiais foram sugeridas, investigadas e utilizadas no projeto e construção de revestimentos de fundo de aterros sanitários. Na ausência

de solos adequados no local de construção do aterro sanitário, a adição de bentonita ao solo local é tradicionalmente usada para construir barreiras impermeabilizantes devido sua grande expansibilidade na presença de fluidos, sendo, portanto, uma alternativa interessante para atender às propriedades que possibilitem o uso do solo local (CORREIA; CALDAS; OLUREMI, 2020; GUIMARÃES; BENATTI; FERREIRA, 2020).

Além disso, o uso de resíduos em barreiras impermeabilizantes é particularmente vantajoso, pois podem reduzir consideravelmente os custos de construção, ajudar a preservar os recursos naturais e contribuir para a sustentabilidade, fazendo uso de materiais que outrora foram considerados resíduos, cuja gestão e eliminação são ambientalmente problemáticas (RUBINOS e SPAGNOLI, 2018; VANDERCASTEELE e VAN DER SLOOT, 2011). Os resíduos podem ser utilizados tanto em estado puro (desde que atendam às recomendações), como misturados a outros materiais, como a bentonita.

Nesse contexto, é justificável o desenvolvimento de pesquisas que proponham possíveis materiais a serem empregados na concepção de barreiras impermeabilizantes, tendo em vista o apelo ambiental resultante de estudos aplicados a sistemas impermeabilizantes, sobretudo na contemporaneidade da definição de sustentabilidade.

1.2 Justificativa

No Brasil, os solos tropicais argilosos possuem potencial de uso em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, sobretudo pela sua elevada resistência mecânica e grande abundância. Entretanto, mesmo compactados, eles muitas vezes não atendem aos valores de condutividade hidráulica recomendados. Por esta razão, a adição de bentonita torna-se uma opção potencial para a redução da condutividade hidráulica destes materiais, e também aumentar sua capacidade de retenção de contaminantes, considerando as elevadas plasticidade e capacidade de troca catiônica (CTC) destes materiais (MORANDINI e LEITE, 2015).

Ainda, de acordo com Morandini e Leite (2015) e Morandini e Schneider (2017), também é necessário levar em consideração que, geralmente, as barreiras constituídas por solos compactados devem resistir e não se deformar excessivamente quando submetidas às tensões de sobrecarga das camadas sobrejacentes e pela interação com os fluidos percolantes. No entanto, a adição de bentonita, necessária à redução da condutividade hidráulica, pode diminuir a resistência mecânica das misturas e aumentar a sua compressibilidade. Assim, além da redução da condutividade hidráulica, que por si só já justifica o estudo de misturas de diferentes solos com diferentes teores de bentonita, avaliações do efeito do aditivo com relação à

resistência ao cisalhamento e à compressibilidade são fundamentais para o potencial aproveitamento de camadas argilosas compactadas em obras geotécnicas cujas principais finalidades são retardar o fluxo de água e/ou contaminantes.

Considerando questões sob a ótica ambiental, além do uso de solos para a construção de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, há de se avaliar também a possibilidade do emprego de alguns tipos de resíduos para essa finalidade, dentre os quais citam-se os rejeitos provenientes das atividades de mineração.

Tal estudo se faz importante tendo em vista a necessidade de reutilizar esse material, considerando que seu armazenamento, normalmente realizado em grandes pilhas ou barragens de material, representa um desafio ambiental, uma vez que o rompimento dessas barragens pode provocar incontáveis danos sociais, ambientais e econômicos (ADIANSYAH *et al.*, 2015; BARATI *et al.*, 2020; MENDES, 2019).

Heider (2019) comenta que o elevado volume de resíduos oriundo da mineração de ferro tem gerado pressão sobre as empresas mineradoras, no sentido da busca de soluções que minimizem os impactos decorrentes e da redução dos riscos de acidentes com barragens de rejeito. Diante desse cenário, o reaproveitamento dos rejeitos de mineração surge como resposta a essa pressão, porém, as soluções implantadas são incipientes e demandam muita pesquisa e estudos de mercado e de viabilidade técnico-econômica.

A proposta de incorporação desse rejeito em novos produtos ou obras de engenharia, como camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, pode contribuir, portanto, para a redução de gastos e riscos, bem como para o desenvolvimento sustentável (CHERIYAN e CHANDRAKARAN, 2020; MENDES, 2019). De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), a disposição final de resíduos no meio ambiente deve ser adotada somente em último caso.

Portanto, considerando o disposto nos parágrafos anteriores, e procurando dar enfoque na pesquisa de materiais para utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, neste trabalho pretende-se investigar os comportamentos mecânico e hidráulico de misturas de bentonita com um solo tropical e com um tipo de rejeito resultante das atividades de mineração de ferro em Minas Gerais.

Os resultados obtidos contribuirão para a ampliação do banco de dados relacionado ao estudo de materiais para utilização como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo de misturas de bentonita com um solo tropical e com um rejeito de mineração, tendo em vista sua aplicação como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Avaliar o efeito da bentonita como aditivo no que diz respeito à condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um solo tropical;
- Avaliar o efeito da bentonita como aditivo no que diz respeito à condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um rejeito de mineração;
- Avaliar o potencial de aplicação das misturas testadas para a construção de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários com base nos critérios atualmente definidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relacionados ao estudo do comportamento de misturas de solo tropical-bentonita e rejeito de mineração-bentonita para emprego como sistemas de proteção de aterros sanitários.

2.1 Resíduos sólidos

Resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). Entre os vários tipos de resíduos, destacam-se os sólidos urbanos, os industriais, os da construção civil, os de serviços de saúde, os portuários e aeroportuários, os lodos de estações de tratamento de água e esgoto, entre outros (SILVA, 2015).

Denominam-se resíduos sólidos urbanos (RSU) aqueles gerados nas residências, nos estabelecimentos comerciais, nos logradouros públicos e nas diversas atividades desenvolvidas nas cidades, incluindo os resíduos de varrição de ruas e praças. Os RSU são geralmente compostos por: materiais putrescíveis (resíduos alimentares, resíduos de jardinagem e varrição, e demais materiais que apodrecem rapidamente), papéis/papelões, plásticos, madeiras, metais, vidros, outros (entulhos, espumas, solos, couro, borrachas, cinzas, tecidos, óleos, graxas, resíduos industriais não perigosos etc.) (BOSCOV, 2008).

A composição do RSU compreende aspectos a considerar em projetos de aterros sanitários. Resíduos domésticos gerados em regiões mais desenvolvidas tendem a apresentar baixos teores de materiais putrescíveis. Em contrapartida, exibem quantidades de materiais industrializados e perigosos maiores em relação a regiões menos desenvolvidas. A composição dos RSU depende fundamentalmente dos hábitos de consumo da população e do desenvolvimento econômico e tecnológico de cada local (SILVA, 2015).

O aumento do crescimento econômico e a rápida urbanização resultou em um rápido aumento na quantidade de RSU e se tornou um fator importante que afeta a saúde humana e o desenvolvimento sustentável de suas cidades (NAMBIAR; REMYA; VARGHESE, 2019; OPAFOLA *et al.*, 2020).

Boscov (2008) salientou a existência de uma tendência mundial em desenvolver legislações e normas para o projeto e construção de locais para disposição de resíduos, que se pautem, tanto por critérios técnicos como por quesitos ambientais. Consoante Budihardjo *et al.*

(2019), um dos métodos mais comuns para disposição e tratamento dos resíduos sólidos é o aterro sanitário. No aterro, os resíduos sólidos vão se decompor e produzir o lixiviado. A fim de prevenir qualquer poluição ambiental, especificamente a contaminação do solo e das águas subterrâneas, o lixiviado não deve escapar do aterro. Os aterros sanitários são eficientes porque se atentam a aspectos que interferem no processo, levando em consideração a avaliação de critérios ambientais, de uso e ocupação do solo e operacionais.

2.2 Aterros sanitários

Atualmente, os aterros sanitários constituem uma das técnicas mais seguras para a disposição final e confinamento dos RSU. Sua implantação e ocupação devem conferir controle de emissão de poluentes capazes de degradar as áreas superficiais e subterrâneas, o solo e o ar. Basicamente, o aterro sanitário consiste em um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente RSU que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública (IPT, 2000).

A CETESB (2013) define aterro sanitário como uma obra de engenharia que tem por objetivo acomodar, no solo, o resíduo no menor espaço possível, gerando assim reduzidos danos ao ambiente e à saúde pública.

O aterro sanitário é diferente dos lixões a céu aberto, os quais são caracterizados pelo descarte indiscriminado dos resíduos, incluindo conteúdo perigoso e não perigoso nos arredores. Os conteúdos perigosos são gerados pelas indústrias, hospitais, bairros residenciais, entre outros, podem incluir resíduos de bateria, produtos químicos, resíduos hospitalares, lixo eletrônico, latas de tinta, entre outros (ANIEKAN; EBUNILO; OKOVIDO, 2018).

O princípio do aterro sanitário é controlar a migração de contaminantes para o meio ambiente através da contenção do resíduo. Logo, os elementos estruturais são projetados com a finalidade de evitar emissões poluentes não permitidas (BOSCOV, 2008).

A técnica empregada em um aterro sanitário consiste basicamente na compactação do resíduo no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com solo ou outro material inerte. Ainda que, sendo o método sanitário mais simples de destinação final de resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário exige cuidados especiais e técnicas específicas a serem seguidas, desde a seleção e preparo da área até sua operação e monitoramento (CETESB, 2013).

Além disso, o aterro sanitário deve operar de modo a fornecer proteção ao ambiente, evitando, por exemplo, a contaminação da água subterrânea pelo lixiviado (líquido de elevado potencial poluidor, de cor escura e de odor desagradável, gerado do resíduo disposto) e evitando o acúmulo do biogás resultante da decomposição anaeróbia do resíduo no interior do aterro. O biogás pode atravessar o interior do aterro de forma descontrolada ou infiltrar pelo solo e atingir redes de esgotos, fossas e poços rasos podendo causar explosões (CETESB, 2013).

As desvantagens do aterro sanitário são pelo fato deste ser uma obra que ocupa áreas relativamente grandes, requerem alto custo de operação e ser uma alternativa apenas de disposição de resíduo, ausente de ações de possíveis tratamentos e reciclagem do material ali depositado (LEME, 2013).

As técnicas de disposição final de RSU em aterros sanitários têm sido cada vez mais difundidas nos municípios brasileiros, consolidando ações de saneamento ambiental voltadas à minoração de riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Questões vinculadas ao gerenciamento adequado dos RSU vêm ganhando importância frente à administração pública, se materializando em legislações, com destaque para a Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), e para a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), as quais se utilizam de instrumentos legais para orientar os municípios a cumprirem com os objetivos do gerenciamento integrado de seus resíduos (SILVA, 2015).

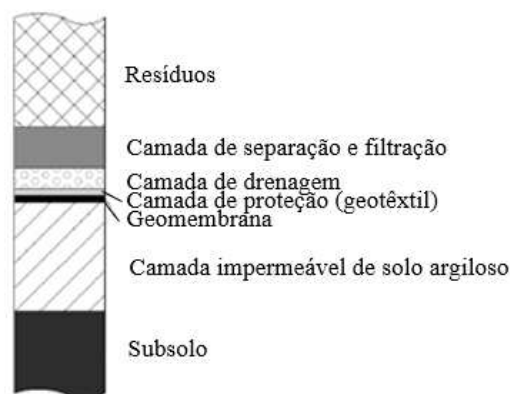
Têm-se, portanto, incentivado cada vez mais a pesquisa por novos recursos tecnológicos que contribuam para a proteção do meio ambiente, como é o caso das barreiras impermeabilizantes ou revestimentos de fundo. Estas barreiras, constituídas por solos compactados, têm como principal função proteger os mananciais da percolação de contaminantes (CAMARGO; SILVA; BASTOS, 2012; LOCASTRO e ANGELIS, 2016).

2.3 Impermeabilização de fundo de aterros sanitários

Atualmente, o grande paradigma do aterro sanitário é o confinamento dos resíduos para evitar a liberação de substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde humana. Um dos principais objetivos é evitar ou minimizar a contaminação do subsolo e principalmente do lençol freático pelo líquido produzido na massa de resíduos (chorume, lixiviado ou percolado), já que a escassez de água potável como recurso natural vem se tornando, a cada dia, um assunto mais preocupante (EYO *et al.*, 2021; LOCASTRO e ANGELIS, 2016; SOARES, 2012). Os revestimentos de fundo impedem a infiltração de efluentes e gases, derivados da biodegradação e lixiviação dos resíduos aterrados, para o subsolo e aquíferos subjacentes, promovem suporte

mecânico para a massa de resíduos e servem como base para implantação de sistemas de drenagem (SILVA, 2015). Os revestimentos de fundo são compostos basicamente por camadas de drenagem e impermeabilização, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Esquema ilustrativo do revestimento de fundo.



Fonte: Boscov (2008).

Para a impermeabilização de base dos aterros sanitários, geralmente são empregadas camadas de solo argiloso compactado (*Compacted Clay Liner* – CCL), geomembranas (GM), geocompostos argilosos (*Geosynthetic Clay Liner* – GCL) ou, ainda, uma combinação destas, desde que alcançada uma condutividade hidráulica de, no máximo, 10^{-7} cm/s (KHALID *et al.*, 2019; SILVA, 2015; OPAFOLA *et al.*, 2020; USEPA, 1989). Segundo Boscov (2008), este valor limite de condutividade hidráulica tornou-se referência para aterros de resíduos, adotado sem maiores questionamentos para a aceitação de materiais e aprovação de projetos.

De acordo com Potter e Yong (1995), o valor de 10^{-7} cm/s, característico de materiais hábeis à construção de barreiras de fluxo e estabelecido por normas técnicas e legislações ambientais de vários países, provém da aplicação da Lei de Darcy para percolação sob gradiente hidráulico unitário através de uma camada impermeabilizante de 1 m de espessura. Tais hipóteses garantem que o percolado demore no mínimo 30 anos para atravessar tal camada, tempo após o qual o percolado não seria mais poluente, dada sua degradação.

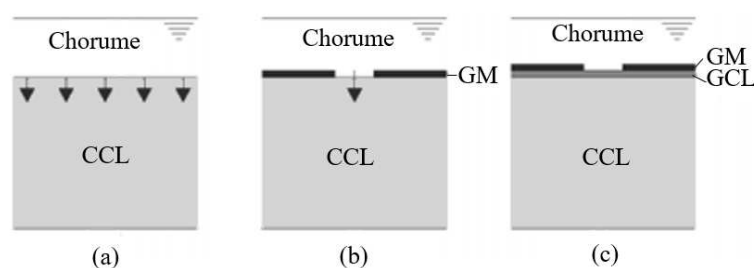
As barreiras de proteção podem ser simples, compostas ou duplas. As barreiras simples são aquelas constituídas por um único tipo de material impermeabilizante, seja solo compactado, seja material geossintético (GM ou GCL). As barreiras compostas e duplas, por sua vez, promovem a interação dos materiais impermeabilizantes supracitados, as quais constituem a solução mais adequada frente à proteção do solo e dos mananciais subterrâneos,

pois reduzem consideravelmente a taxa de infiltração de percolado através da camada de solo de apoio (SILVA, 2015).

Usualmente, os sistemas compostos, formados por dois ou mais sistemas com a função de impedir a passagem do contaminante pelo meio, têm sido os mais utilizados como barreiras impermeabilizantes devido ao seu efeito atenuante contra qualquer defeito local das geomembranas, das camadas de solo e dos geocompostos bentoníticos. Além disso, apresentam como vantagens adicionais a proteção contra trincas de secagem, especialmente em solos lateríticos, e a prevenção contra problemas de incompatibilidade entre líquidos e percolados (MARTINS, 2017).

De acordo com Koerner (2005), a probabilidade de ocorrência de vazamentos em barreiras compostas pela combinação de GM, GCL e CCL é praticamente nula, visto que o GCL atua como sistema de detecção de vazamentos, impedindo o fluxo direto de efluentes através de furos ou defeitos locais da geomembrana em direção à camada de solo compactado. A Figura 2 ilustra três tipos de barreiras de proteção, exemplificando possíveis problemas de infiltração vinculados às diferentes combinações de materiais utilizados como barreira.

Figura 2: (a) barreira simples de solo compactado e barreiras compostas de (b) geomembrana e solo compactado e (c) geomembrana, geocomposto argiloso e solo compactado.



Fonte: Silva (2015).

Os GCLs são frequentemente usados como componentes de barreiras impermeabilizantes em revestimentos de fundo e coberturas de aterros. GCLs são geossintéticos multicamadas contendo uma fina camada de bentonita entre dois geotêxteis que são unidos por fibras (CHEN *et al.*, 2017).

Nos dias de hoje, o GCL vem ganhando popularidade sobre o CCL. Contudo, a técnica GCL é muitas vezes limitada em países em desenvolvimento devido a sua indisponibilidade em todas as localidades, custo comparativamente mais alto, dificuldades na instalação e incerteza de seu desempenho no futuro (PRONGMANEE *et al.*, 2021; ROUT e SINGH, 2020; THANKAM; REKHA; SHANKAR, 2017).

Sendo assim, revestimentos de fundo constituídos por CCL, principalmente bentonitas, compreendem uma das técnicas tradicionalmente utilizadas para a contenção e atenuação de poluentes em áreas de disposição de resíduos devido ao seu baixo custo, grande capacidade de atenuação de lixiviado, resistência a danos, tamanho de partícula muito pequeno, área de superfície alta, capacidade de troca catiônica (CTC), comportamento de alta expansão e, especialmente, condutividade hidráulica muito baixa para a água. Nenhuma regulamentação legal internacional unificada e abrangente está disponível para uso na construção de um revestimento de fundo de CCL (WIDOMSKI; STEPNIEWSKI; MUSZ-POMORSKA, 2018).

Para garantir a segurança do revestimento de fundo, as camadas impermeabilizantes devem ser executadas com rigoroso controle tecnológico de compactação, de forma a se obter camadas compactadas de, no máximo, 20 cm de espessura cada, umidade em torno da umidade ótima obtida no ensaio de compactação com energia Proctor Normal, densidade de, no mínimo 95% da densidade máxima obtida no ensaio de compactação e coeficiente de permeabilidade de, no máximo, 10^{-7} cm/s (LANGE *et al.*, 2008). Segundo Boscov (2008), em sistemas de impermeabilização constituídos apenas por camadas de CCL, isto é, em sistemas simples, a barreira tem a função de impermeabilização e atenuação do contaminante. Em geral, para que se possam cumprir essas funções, as barreiras impermeabilizantes devem apresentar as características principais de baixa condutividade hidráulica, estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries e compatibilidade com os resíduos a serem depositados.

Em barreiras de proteção compostas, o CCL cumpre funções de suporte para sistemas de drenagem, proporcionando base lisa e resistente, e de defesa secundária no caso de ocorrência de vazamentos através dos geossintéticos subjacentes. Para alcançar o desempenho desejado, a camada de solo compactado deve apresentar baixa condutividade hidráulica, compatibilidade química em longo prazo com os poluentes, alta capacidade de retenção de poluentes, baixo coeficiente de difusão, alta capacidade de suporte e baixa compressibilidade (BOSCOV, 2008).

A adição de bentonita pode viabilizar a utilização dos solos presentes nas proximidades do aterro na construção de camadas CCL de aterros sanitários, do ponto de vista da permeabilidade. Por outro lado, esta pode causar mudanças nas propriedades mecânicas, hidráulicas, químicas e mineralógicas do solo, que podem comprometer a integridade do CCL, levando à contaminação do subsolo e das águas subterrâneas (FREMPONG e YANFUL, 2008).

Consoante Martins (2017), a compatibilidade das barreiras impermeáveis com os percolados é outra propriedade que merece atenção. Os líquidos provenientes da decomposição

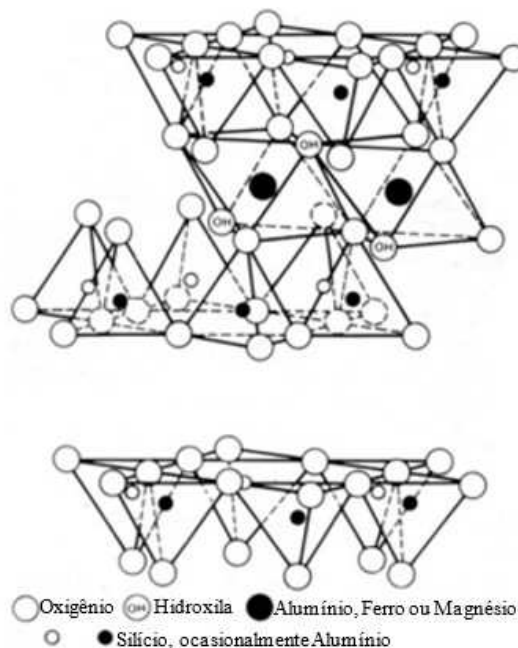
dos resíduos (percolados) podem atacar e destruir o sistema de impermeabilização basal, aumentando a sua permeabilidade. Além disso, podem provocar modificações na resistência e na compressibilidade da camada compactada.

2.4 Bentonita

O nome bentonita foi adotado em função do depósito descoberto em folhelhos argilosos de Fort Benton, Wyoming, (EUA), onde essa argila foi pela primeira vez caracterizada como um tipo especial de argila (SANTOS, 1989).

Do ponto de vista químico, as bentonitas são filosilicatos hexagonais de alumínio e magnésio hidratados. As bentonitas possuem na sua constituição cátions trocáveis, que são derivados do desbalanceamento de cargas de sua estrutura. Este fato ocorre durante o intemperismo ácido na formação do argilomineral montmorilonita. Todos os tipos de bentonita possuem um ou vários argilominerais do grupo da esmectita, com a montmorilonita como argilomineral predominante. As argilas constituídas por esses argilominerais possuem elevada plasticidade e apresentam grandes variações nas suas propriedades físicas. Tais variações ocorrem devido à existência de cátions trocáveis hidratados na sua estrutura e as alterações que ocorrem nas posições octaédricas do argilomineral (ANIEKAN; EBUNILO; OKOVIDO, 2018; LUKIANTCHUKI, 2007; SANTOS, 1989). A estrutura cristalina da montmorilonita é apresentada na Figura 3.

Figura 3: Estrutura cristalina da montmorilonita.



Fonte: Mitchell e Soga (2005).

De acordo com Guimarães; Benatti; Ferreira (2020) e Lemos *et al.* (2008), a adição de bentonita ao solo é comum na literatura, sendo esta uma das argilas mais utilizadas na Geotecnia, em especial na Geotecnia Ambiental, visto que esta é uma argila de alta plasticidade, baixa permeabilidade e possui características tixotrópicas em presença de água. As características que apresenta, em virtude do alto teor de umidade quando hidratada, colaboram com a sua utilização em diversas obras de engenharia, como obras de estabilização, barreiras de contaminantes e barreiras horizontais de impermeabilização.

A elevada afinidade da bentonita com a água e sua alta capacidade de expansão são características que conferem a este material resistência à passagem de água. Em condições confinadas, as partículas expandidas são forçadas entre si de maneira que ocorra o preenchimento dos vazios entre as partículas do solo, formando uma barreira contra a passagem de fluxo (LUKIANCHUKI, 2007).

As propriedades da bentonita, ao tornarem possível a redução da condutividade hidráulica da mistura e a melhora da sua capacidade de sorção quando misturada com solos naturais, sugerem que a sua utilização é adequada para revestimentos de aterros. As características do lixiviado são um elemento importante a considerar na seleção de uma proporção adequada à mistura (GUPT *et al.*, 2020; THANKAM; REKHA; SHANKAR, 2017).

Além da redução da condutividade hidráulica, a bentonita ainda possui propriedades coloidais desejáveis em materiais impermeabilizantes, tais como expansividade, elevada CTC e elevada capacidade sorciva e atenuante. Estas propriedades aumentam a capacidade de impermeabilizar e/ou retardar o fluxo de água ou contaminantes (MORANDINI e SCHNEIDER, 2017).

Consoante Martins (2017), comercialmente são encontrados dois tipos de bentonita, separados conforme sua CTC, as bentonitas cálcicas, quimicamente mais estáveis, e as bentonitas sódicas, que possuem como propriedade maior inchamento quando em presença de água.

A bentonita mais comumente usada em barreiras impermeabilizantes projetadas para controle hidráulico e contenção de contaminantes é a bentonita sódica, na qual o cátion Na^+ é responsável pela expansão do material em presença de água. Ao se expandir, esta tem o poder de auto cicatrização, reduzindo a probabilidade do lixiviado atravessar a barreira impermeabilizante pelas possíveis fissuras que podem aparecer com o tempo de funcionamento. Também devido à sua característica expansiva sob condições confinadas, assim como nas barreiras verticais, as partículas expandidas da bentonita são forçadas uma contra as outras, preenchendo os vazios entre as partículas de solo, formando uma barreira contra a passagem do fluido (SILVA, 2015; STEUDEL; MEHL; EMMERICH, 2013).

2.5 Solos tropicais

Os solos tropicais possuem peculiaridades em relação aos solos de origem temperada devido às condições climáticas nas quais são formados, apresentando estrutura e composição químico-mineralógica diferenciada. Essas características influenciam diretamente os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos, tanto naturais como compactados (QUEIROZ, 2015). Pode-se destacar duas classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

Os solos lateríticos são solos superficiais, típicos das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas, resultantes de uma transformação da parte superior do subsolo pela atuação do intemperismo, por processo denominado laterização. Este processo pode ser explicado pela presença de cimentação devido a óxidos de ferro ou alumínio, que normalmente formam estruturas metaestáveis e de alta porosidade, devido à migração de partículas e compostos químicos solúveis na zona não saturada, resultando em um comportamento colapsível (BENATTI e MIGUEL, 2013; KASIM *et al.*, 2017; VILLIBOR *et al.*, 2009).

Várias peculiaridades associam-se ao processo de laterização, sendo as mais importantes do ponto de vista tecnológico, o enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argilo-mineral predominante e quase sempre exclusivo. Estes minerais conferem aos solos de comportamento laterítico uma coloração típica: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado (VILLIBOR *et al.*, 2009).

Ainda, de acordo com Villibor *et al.* (2009), os solos saprolíticos são resultantes da decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz pela ação das intempéries, mantêm nitidamente a estrutura da rocha que lhe deu origem, sendo também designados de solos residuais jovens. Esses, portanto, constituem a parte subjacente à camada de solo superficial laterítico.

Nos solos tropicais tem-se mais intemperismo químico, em que a ação da água é muito importante, alterando as forças internas e externas, gerando hidrólises, lixiviação, acumulação, oxidação e outros processos nos quais se alteram algumas propriedades e minerais dos solos, gerando-se os solos lateríticos. Isso pode acontecer em todos os solos, sejam eles residuais ou transportados (LOPERA, 2016).

2.5.1 Microestrutura e mineralogia

Os vazios presentes no solo constituem os poros, os quais podem ser divididos em microporos e macroporos, respectivamente menores e maiores que 0,05 mm (RESENDE *et al.*, 2007).

O comportamento mecânico e hidráulico dos solos encontra-se relacionado à sua estrutura, podendo esta ser dividida em macro e microestrutura. A macroestrutura diz respeito à observação do todo e a microestrutura ao arranjo estrutural dos grãos e partículas. Nos solos granulares geralmente predomina a influência da macroestrutura, enquanto nos solos finos é relevante a microestrutura (CARVALHO *et al.*, 1987).

O desenvolvimento de um tipo específico de estrutura do solo é geralmente uma consequência do material de origem e dos processos e fatores de formação do solo, e estes condizionarão muitas das suas propriedades físicas (CARDUCCI *et al.*, 2012).

A mineralogia é o principal fator controlador do tamanho, da forma e das propriedades físicas e químicas das partículas do solo, intervindo diretamente em seu comportamento hidromecânico. Alguns minerais têm particular relevância para o entendimento do comportamento hidromecânico dos solos, pela frequência com que estão presentes e pela influência que exercem sobre esse comportamento, mesmo não sendo os minerais

predominantes na composição do solo. Como exemplo, citam-se os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio que são muito frequentes nos solos brasileiros e influenciam na estrutura, nas propriedades e no comportamento hidromecânico desses solos, mesmo que não sejam predominantes na composição (CARVALHO *et al.*, 2015).

2.5.2 Comportamento do solo tropical em aterros sanitários

Os solos lateríticos apresentam-se como opção atrativa para revestimentos de aterros sanitários devido à maior resistência ao cisalhamento, resistência química, melhor trabalhabilidade e disponibilidade dentro da distância econômica de transporte em regiões tropicais, onde ocorrem em abundância. No entanto, o solo tem alta condutividade hidráulica devido à predominância de caulinita (AMADI e EBEREMU, 2013).

De acordo com Morandini e Leite (2015), solos tropicais possuem grande potencial para utilização em base compactada de aterros considerando sua disposição ao longo do globo terrestre. No entanto, para serem utilizados como barreira impermeabilizante algumas características devem ser corrigidas, incluindo a redução da condutividade hidráulica, capacidade de retenção de contaminante e melhora de seu desempenho ao longo do tempo.

A composição mineralógica do solo exerce elevada influência nos valores de condutividade hidráulica, estando também diretamente ligada ao seu índice de plasticidade. Argilas do grupo das montmorilonitas (elevados índices de plasticidade) apresentam valores de condutividade hidráulica menores que as argilas do grupo das caulinitas (baixos índices de plasticidade) (MARTINS, 2017).

A estrutura do solo é um outro fator que influencia a condutividade hidráulica dos solos. Mitchell, Hooper e Campanella (1965) observaram que a condutividade hidráulica é sensível ao teor de umidade e à energia de compactação. Em seus estudos, os autores mostram que com o aumento da energia de compactação ou do teor de umidade no ramo úmido da curva de compactação, há uma correspondente diminuição da condutividade hidráulica do solo, cujos valores mais baixos foram obtidos para teores de umidade acima de, aproximadamente, 2 a 4% do teor de umidade ótimo.

A mudança na condutividade hidráulica do solo, devido a variações no teor de umidade de moldagem ou na energia de compactação, resulta diretamente de certas modificações na sua estrutura interna (SILVA, 2015).

Sendo assim, o distúrbio estrutural, em macroescala, causado pelo aumento do teor de umidade ou do esforço de compactação, é refletido na extinção dos agregados de argila, com

eventual fusão dos mesmos, e eliminação dos poros interagregados. Em microescala, há correspondente reorientação das partículas de argila em um arranjo mais disperso, com redução no tamanho dos poros interpartículas. Estas mudanças ocasionam a diminuição da condutividade hidráulica dos solos coesivos compactados (MITCHELL; HOOPER; CAMPANELLA, 1965).

Macambira (2002) analisou o potencial de alguns solos lateríticos compactados para a construção de barreiras impermeáveis. Verificou-se que, em geral, a condutividade hidráulica diminui com o aumento do teor de umidade, até o teor de umidade ótimo, permanecendo praticamente constante ou diminuindo ligeiramente a partir daí. Observou-se que o aumento da energia de compactação diminui a condutividade hidráulica de forma pronunciada no ramo seco da curva de compactação. Para teores de umidade superiores ao teor de umidade ótimo as variações foram pequenas para energias acima de 12 golpes.

Consoante Boscov (2008), não se deve selecionar um material para construção de barreira impermeabilizante em regiões tropicais tendo em vista somente a permeabilidade. Outros atributos devem ser utilizados e incorporados aos critérios usuais, tais como a verificação das propriedades de resistência ao cisalhamento e compressibilidade, uma vez que misturas com outros materiais podem alterar esses parâmetros, possibilidade de trincas de contração em solos lateríticos, capacidade de atenuação dos contaminantes e compatibilidade com os líquidos percolados.

Devido à importância do assunto em questão, estudos têm sido realizados para avaliar o comportamento de solos tropicais como revestimentos de fundo de aterros sanitários (CAMARGO; SILVA; BASTOS, 2012; GUIMARÃES; BENATTI; FERREIRA, 2020; LUKIANTCHUKI, 2007; LUKIANTCHUKI e ESQUIVEL, 2010; MARTINS, 2017; MORANDINI e LEITE, 2015; MORANDINI e SCHNEIDER, 2017; SILVA, 2015). Tendo em vista o disposto anteriormente e considerando a extensão brasileira, pode-se observar que as informações relacionadas à eficiência de camadas de solos tropicais ainda não foram consolidadas, necessitando a realização de novos estudos sobre o tema.

2.6 Resíduos em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários

Desde sempre, qualquer ação humana conduz à produção de resíduos. Neste raciocínio, a utilização dos diversos tipos de resíduos e subprodutos em barreiras de aterros sanitários é uma solução viável e opção de aplicação benéfica, especialmente considerando o contexto

global de esgotamento progressivo dos recursos naturais e mudanças climáticas (RUBINOS e SPAGNOLI, 2018).

Tradicionalmente, os solos argilosos têm sido usados em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários devido, principalmente à sua baixa permeabilidade e abundância (CHERIYAN e CHANDRAKARAN, 2020). Consoante Correia, Caldas e Oluremi (2020) e Rubinos e Spagnoli (2018), curiosamente, nos últimos anos, houve uma mudança de paradigma nas pesquisas objetivando a obtenção de alternativas sustentáveis em materiais naturais e residuais, que podem servir como potenciais materiais de construção para revestimentos de aterros sanitários, em detrimento à utilização de solos. Entre estes materiais e soluções sustentáveis, destaca-se o uso de resíduos de construção e demolição (RCD), do processamento da madeira, de mineração, da fabricação do cimento, agroindustriais, de polietileno tereftalato (PET), de borracha de pneu, da siderurgia, de lodo de estação de tratamento de água (ETA), entre outros.

O uso de resíduos como revestimento de fundo de aterros sanitários é particularmente vantajoso, pois podem reduzir consideravelmente os custos de construção e ajudar a preservar os recursos naturais. Além disso, fazendo-se uso de materiais que outrora foram considerados resíduos, cuja gestão e eliminação são ambientalmente problemáticas, transforma-se o resíduo em um recurso valioso (VANDERCASTEELE e VAN DER SLOOT, 2011).

A depender do tipo de aplicação, a reutilização de um resíduo estará condicionada a fatores econômicos e tipo de obra aplicada. Os custos de mobilização e transporte podem em alguns casos elevar os custos produtivos inviabilizando a utilização do resíduo. Nesse sentido, algumas aplicações geotécnicas podem ser privilegiadas, como o uso em rodovias e materiais de revestimentos de aterros de resíduos sólidos (GONDIM, 2020).

2.6.1 Rejeito de mineração

A mineração pode ser definida como um conjunto de processos cujo o objetivo é explorar e extrair minerais encontrados na natureza, sendo que, conforme Carvalho *et al.* (2018), nesse tipo de atividade os principais resíduos gerados se constituem nos resíduos sólidos de extração, em geral deixados na área da própria mina, denominados de estéril e os resíduos do tratamento/beneficiamento, denominados de rejeito.

Segundo estes mesmos autores, as características dos rejeitos variam de acordo com o tipo de mineral e de seu tratamento na planta de beneficiamento. Os rejeitos podem ser finos, compostos de siltes e argilas, depositados sob a forma de lama (polpa) ou formados por

materiais arenosos, que apresentam granulometria mais grossa, denominados rejeitos granulares.

O Brasil é considerado um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo, com uma produção de, aproximadamente, 453,7 milhões de toneladas no ano de 2017 (DNPM, 2018). Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2016), para cada tonelada de minério de ferro processado no Brasil, são produzidos 400 kg de rejeitos.

Heider (2019) relata que o elevado volume de resíduos oriundo da mineração de ferro tem gerado pressão sobre as empresas mineradoras, no sentido da busca de soluções que minimizem os impactos decorrentes e da redução dos riscos de acidentes com barragens de rejeito. Nesse sentido, o reaproveitamento dos rejeitos de mineração surge como resposta a essa pressão, porém, as soluções implantadas são incipientes e demandam muita pesquisa e estudos de mercado e de viabilidade técnico-econômica.

De acordo com Gondim (2020), a reutilização de rejeitos de mineração tem sido bastante incentivada, uma vez que, do ponto de vista de gestão destes resíduos, seu armazenamento, normalmente feito em grandes pilhas ou barragens de material, representa um desafio ambiental.

Dentre as diversas formas de deposição destes materiais, as mais utilizadas são as barragens. Estas estruturas são reconhecidas por provocarem significativos impactos ambientais. Algumas são mantidas em boas condições de funcionamento, atendendo às normas de segurança mais exigentes. Outras operam com graves riscos, o que pode resultar no seu rompimento (ESPÓSITO e DUARTE, 2010; MENDES, 2019).

Em todo o mundo, há uma busca por soluções que visem a aplicação tecnicamente viável e ambientalmente possível destes materiais (GONDIM, 2020). Em seu trabalho, Silva *et al.* (2017), demonstraram que dentre as áreas de atividade econômica em que o reuso do rejeito de mineração tem relevância, a construção civil se destaca com 89% dos estudos.

Tendo em vista a redução dos impactos associados, diversas formas de reaproveitamento dos resíduos de mineração vêm sendo propostas, dentre elas a sua utilização como revestimento de fundo de aterros sanitários (CHERIYAN e CHANDRAKARAN, 2020; DEVARANGADI e SHANKAR, 2020; GONDIM, 2020; MARITSA *et al.*, 2016; RAMADAM *et al.*, 2021; RUBINOS e SPAGNOLI, 2018; YUSUF; SLIM; UCHECHUKWU, 2016).

2.7 Emprego da bentonita em solos e resíduos

Atualmente, as misturas de bentonitas aos solos ou em diversos tipos de resíduos tornaram-se importantes alternativas para utilização como revestimento de fundo de aterros de resíduos, devido não apenas à sua importância econômica, mas também ambiental.

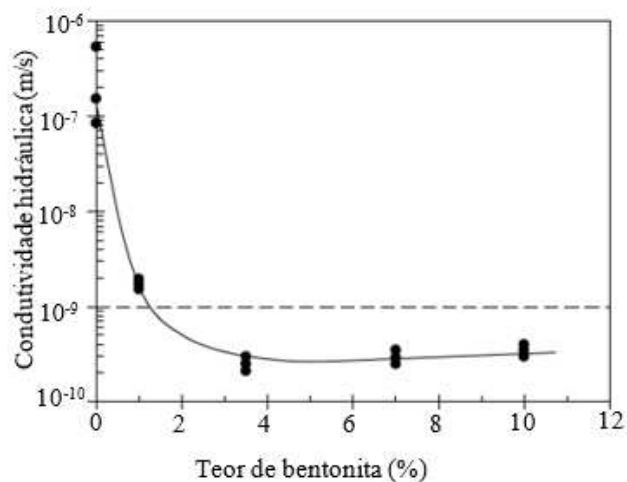
O uso de materiais locais pode ser apropriado, desde que sejam cumpridos os requisitos mínimos para barreiras impermeabilizantes e de custos. Quando tais requisitos não são cumpridos, misturas solo-bentonita são comumente usadas, tendo em vista que os solos disponíveis nas proximidades não atendem aos requisitos de condutividade hidráulica (KUMAR e YONG, 2002).

Segundo Rowe (2001), o sucesso na construção de revestimentos solo-bentonita com baixa condutividade hidráulica depende da obtenção e manutenção de uma mistura homogênea do solo base com a bentonita, de maneira a evitar a segregação antes e durante sua aplicação e a realização de um controle tecnológico durante a compactação.

Barreiras impermeáveis de solo-bentonita desempenham funções de segurança ou proteção total contra a infiltração de efluentes gerados pela biodegradação e lixiviação dos resíduos confinados. Em revestimentos compostos, a camada de solo-bentonita compactada, disposta sob o GCL e/ou GM, impede o fluxo direto de poluentes advindos de defeitos locais nos materiais sobrejacentes. Em barreiras simples, o revestimento mineral constitui o único elemento de proteção, interagindo diretamente com os resíduos confinados e seus percolados. Dependendo das características químicas do líquido contaminado, a função de impermeabilização atribuída às barreiras selantes de solo-bentonita pode vir a se comprometer (SILVA, 2015).

De acordo com Daniel (1993), a utilização de bentonita misturada ao solo é recomendada em locais onde o solo apresenta-se inadequado para a construção de barreiras impermeáveis, de forma que se consiga obter baixos valores de condutividade hidráulica. Além disso, uma pequena quantidade de bentonita pode acarretar uma diminuição em várias ordens de grandeza no valor da condutividade hidráulica de determinado solo, conforme demonstrado na Figura 4. Porém, este intervalo não se aplica a todos os casos, tornando-se imprescindível determinar, a partir de ensaios laboratoriais, o teor mínimo de aditivo necessário para diminuir a condutividade hidráulica de amostras de solo compactado até o valor especificado (SILVA, 2015).

Figura 4: Efeito do teor de bentonita na condutividade hidráulica.



Fonte: Daniel (1993).

De acordo com Locastro e Angelis (2016), para aterros com resíduos não perigosos, a mistura entre um solo argiloso compactado e adição de aproximadamente 4% de bentonita resulta numa barreira impermeabilizante com coeficiente de permeabilidade de 10^{-9} m/s.

As camadas de impermeabilização de solo-bentonita são confeccionadas utilizando-se as bentonitas sódicas, sendo o cátion Na^+ o responsável pela expansão que ocorre no sistema. O mecanismo de expansão funciona através de fenômenos de absorção e adsorção. A absorção ocorre primeiramente e consiste na entrada de água entre as lamelas da bentonita, garantindo a expansão mais benéfica do material para a utilização em impermeabilização de solos. Em seguida ocorre a adsorção, caracterizada por reações químicas que ocorrem entre a água e a bentonita e provocam uma nova expansão do material (LUKIANCHUKI, 2007).

Consoante Lukiantchuki (2007), nos projetos de impermeabilização de solos é necessário que ocorra uma alta expansão, associada a uma retração dessas partículas e seguida novamente por uma expansão. Essa propriedade, denominada de cicatrização, é o que garante a eficiência da camada ativa diferenciando as bentonitas específicas para camadas de impermeabilização das bentonitas genéricas. Assim, a mistura solo-bentonita trabalha continuamente evitando que fluidos transpassem a camada tratada.

Conforme o exposto acima, uma baixa condutividade hidráulica pode ser obtida utilizando-se solos argilosos com alta plasticidade, em especial as argilas bentoníticas. No entanto, estas apresentam características de contração e expansão, que dependem das condições de umidade e temperatura do ambiente. Dessa forma, durante as estações mais secas do ano, o ressecamento das camadas pode ocasionar o surgimento de fissuras e criar caminhos

preferenciais para o transporte de fluidos, provocando um aumento considerável da condutividade hidráulica e a perda da função impermeabilizante nas camadas (GUPT *et al.*, 2021; KAYA e DURUKAN, 2004; RESTREPO, 2015).

Ao selecionar materiais para a construção de barreiras impermeabilizantes, deve-se levar em consideração, além das características de condutividade hidráulica, a resistência ao cisalhamento do material, uma vez que, caso este último não seja levado em consideração, o desempenho do revestimento pode ser afetado negativamente (BOSCOV, 2008).

Sendo assim, a consideração de um material para a construção de barreiras impermeáveis levando-se em conta apenas a condutividade hidráulica, e desprezando-se a resistência ao cisalhamento, pode resultar em comprometimento do comportamento das barreiras. Essas barreiras podem sofrer solicitações devido à acomodação e peso próprio dos resíduos, cargas pontuais e eventuais mudanças de temperatura. Assim, a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento torna-se imprescindível para a verificação da estabilidade dessas barreiras impermeáveis (LUKIANCHUKI, 2007).

Além disso, a adição de bentonita, necessária à redução da condutividade hidráulica, pode diminuir a resistência mecânica das misturas. Dessa forma, avaliações da perda de resistência ao cisalhamento de misturas de diferentes solos com diferentes teores de bentonita são fundamentais para a determinação do potencial aproveitamento desses materiais como revestimentos de fundo de aterros sanitários (MORANDINI e LEITE, 2015).

Para o estudo da resistência ao cisalhamento dos materiais usados em camadas de aterros sanitários, a melhor condição de campo é representada por ensaios consolidados isotropicamente e não drenados (CIU). Isto porque o ensaio representa a situação na qual inicialmente o maciço de solo se encontra em equilíbrio sob as tensões aplicadas, sendo a seguir solicitado por um carregamento rápido, que resulta na geração de excesso de poropressões devido à baixa condutividade hidráulica dos materiais utilizados, podendo ocasionar a ruptura (MARTINS, 2017).

Ademais, é esperado que a adição de bentonita, tendo em vista a aplicação como revestimento de fundo de aterros sanitários, aumente a compressibilidade dos solos, podendo gerar deformações excessivas e comprometimento da integridade da barreira. Por este motivo, as barreiras de solo compactado são geralmente empregadas em associação com geossintéticos (MORANDINI e SCHNEIDER, 2017).

Camargo, Silva e Bastos (2012) avaliaram a condutividade hidráulica de misturas compostas pelo solo arenoso do novo aterro sanitário do município de Rio Grande – RS e bentonita. Também foram realizados ensaios para a caracterização geotécnica e química do solo

na condição natural, da bentonita e da mistura tecnicamente viável quanto à utilização como barreira mineral. Para esta última, também foi feita a caracterização e determinação de propriedades pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Através dos ensaios de condutividade hidráulica das misturas estudadas, constatou-se uma contínua diminuição do valor da condutividade hidráulica com o teor de bentonita. Contudo, somente a mistura com 14% de bentonita habilita este solo para a construção de barreiras minerais em obras geotécnicas, tais como aterros sanitários e bacias para contenção de resíduos industriais.

Morandini e Leite (2015) realizaram um estudo laboratorial em misturas de bentonita e solo laterítico da região de Ouro Preto – MG. O estudo teve por objetivo determinar a redução da condutividade hidráulica do solo laterítico proporcionada pela adição de bentonita, assim como avaliar possíveis quedas na resistência ao cisalhamento. Isto para fins de aplicação em sistemas basais de selagem em aterros sanitários. Foram desenvolvidos ensaios de caracterização, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento. Em termos de condutividade hidráulica, verificou-se sua diminuição não linear com o aumento do teor de bentonita. A adição da bentonita reduziu a resistência ao cisalhamento do solo laterítico. Além disso, a adição da bentonita aumentou significativamente a compressibilidade do solo laterítico. De um modo geral, o estudo demonstrou que a referida mistura pode ser uma alternativa construtiva para os selos basais, desde que sejam ponderados todos os fatores de interação entre a bentonita e o solo laterítico.

Lukiantchuki e Esquivel (2010) realizaram ensaios de condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento em misturas de uma areia argilosa residual laterítica, do município de Pindorama – SP e bentonita com teores de bentonita de 3%, 5% e 7%. Os resultados mostraram que as misturas com teor de bentonita de 6% são adequadas, em termos de condutividade, para a construção de revestimentos de aterros sanitários. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e misturas foram avaliados através da realização de ensaios de compressão triaxial (CIU) e ensaios de compressão simples. Foi observado que a adição de bentonita ao solo fez com que o ângulo de atrito diminuísse e a coesão aumentasse. Os resultados dos ensaios de compressão simples mostraram que a resistência do solo natural é maior que das misturas solo-bentonita. A mistura com teor de bentonita de 5% apresenta maior resistência não confinada quando em comparação com as outras misturas.

Martins (2017) avaliou tanto a permeabilidade quanto a resistência mecânica e expansão do solo tropical no estado puro e das misturas alternativas em percentuais de 3%, 5%, 7% e 9% de bentonita. Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em permeômetros de parede flexível. Os resultados dos ensaios mostraram que a adição de bentonita reduziu

consideravelmente a condutividade hidráulica do solo tropical. Além disso, para todas as misturas alternativas, a condutividade hidráulica apresentou valores adequados para a construção de barreiras impermeáveis. No quesito resistência à compressão simples, foi possível observar um decréscimo, na amostra com 3% de bentonita, seguido de um aumento considerável nas amostras subsequentes.

Guimarães, Benatti e Ferreira (2020) analisaram o comportamento hidráulico de um solo argilo areno-argiloso onde será construído o aterro sanitário de Sinop – MT. Foram feitas análises físico-químicas e mineralógicas com amostras do solo puro e com adição de três teores de bentonita: 2%, 4% e 6%. Verificou-se que as partículas do solo, no estado natural, na forma de agregados, não são quebradas na compactação, apresentando comportamento hidráulico similar ao de uma areia. A caracterização química revelou que o solo natural é ácido com baixos teores de nutrientes e não se mostrou eficiente para uso em barreiras impermeabilizantes em virtude do alto potencial de perdas por lixiviação. A adição de bentonita não influenciou nas propriedades de permeabilidade e condutividade hidráulica do solo estudado devido à predominância de argilas com baixa atividade.

Kavya e Anjana (2016) estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas lateríticas de solo-bentonita, concentrações de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% e 15% para sua adequação como barreira impermeabilizante. A análise dos dados obtidos indicou redução da condutividade hidráulica para níveis aceitáveis para utilização como revestimento de fundo. Já com relação à resistência à compressão simples, os resultados mostram um aumento da resistência com o aumento do teor de bentonita.

Kumar e Yong (2002) realizaram um estudo experimental em misturas argilo-bentoníticas compactadas para desenvolver dados sobre o efeito da bentonita nas propriedades de engenharia de misturas compactadas argila-bentonita. Foram testadas misturas com teores de bentonita de até 7%. Os resultados indicaram que a condutividade hidráulica diminuiu linearmente com o aumento do teor de bentonita. Além disso, a adição de bentonita aumentou a compressibilidade das misturas argilo-bentoníticas compactadas.

Camargo (2012) analisou o comportamento de um solo arenoso puro e suas misturas com bentonita nos teores de 2%, 4% e 6%. Os valores de condutividade hidráulica diminuíram tanto com o acréscimo do teor de bentonita, como com o aumento da tensão de confinamento. Com relação à resistência ao cisalhamento, constatou-se que com o acréscimo do teor de bentonita, houve uma redução do ângulo de atrito e um aumento da coesão efetiva.

Morandini e Schneider (2017) apresentaram resultados de compressibilidade em misturas de um solo laterítico, bentonita e fibras. Foram testadas amostras de solo laterítico,

mistura contendo solo laterítico e 5% de bentonita e mistura contendo solo laterítico, 5% de bentonita e 1% de fibras de polipropileno. Os ensaios englobaram caracterização mineralógica do solo laterítico e da bentonita, avaliação das propriedades geotécnicas e avaliação de compressibilidade em célula de adensamento com 5 estágios de carregamento. De forma geral, os resultados demonstraram aumento da plasticidade e da compressibilidade no solo laterítico devido à adição de bentonita, fato que pode comprometer a integridade física de uma barreira composta por tal material. O índice de compressibilidade aumentou 114%. Por outro lado, a adição de fibras de polipropileno à mistura solo-bentonita não resultou em diminuição da compressibilidade, demonstrando ineficiência da aplicação de fibras de polipropileno para o uso em barreiras de fluxo.

Sobti e Singh (2017) analisaram as propriedades de engenharia (compactação, condutividade hidráulica e consolidação) de misturas de areia-bentonita e silte-bentonita com teor de bentonita variando de 0 a 40%, visando aplicação das mesmas como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. A adição de bentonita causou um aumento no teor de umidade ótimo e uma redução na densidade seca máxima das misturas. Foi possível observar uma redução da permeabilidade com o a adição da bentonita. Também foi possível observar um aumento na compressibilidade e redução do coeficiente de adensamento (c_v) com o aumento do teor de bentonita.

A combinação de resíduos e bentonita também vem sendo estudada, tendo em vista que, dependendo do material, suas partículas têm tamanhos maiores e, conseqüentemente, não cumpririam os requisitos de condutividade hidráulica necessários para sua utilização como barreiras impermeabilizantes (CORREIA; CALDAS; OLUREMI, 2020).

Correia Caldas e Oluremi (2020) estudaram o desempenho geotécnico de misturas da fração fina de RCD com diferentes teores de bentonita sódica. Os resultados mostraram que a plasticidade das misturas aumentou significativamente com um pequeno incremento de bentonita. A condutividade hidráulica diminuiu drasticamente com a adição de bentonita, atingindo o valor de 10^{-7} cm/s com 16% de bentonita, o que corrobora para a aplicação de misturas RCD-bentonita como material de revestimento de aterro sanitário.

Ramadam *et al.* (2021) realizaram ensaios de condutividade hidráulica em misturas de resíduos industriais de metal e bentonita, nas concentrações de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Os resultados mostraram que a mistura que atendeu os requisitos de condutividade hidráulica foram as de 20% e 25% de bentonita.

Cheriyen e Chandrakaran (2020) estudaram o efeito de um resíduo industrial rico em óxido de ferro como material para revestimento de fundo de aterros sanitários. Uma mistura

contendo 75% de solo argiloso, 25% de resíduos industriais e 5% de bentonita foi encontrada para satisfazer todos os requisitos para revestimento de fundo.

Elias, Soares e Souza (2017) estudaram a utilização das cinzas volantes como material impermeabilizante em aterros sanitários. Foram analisadas misturas de cinzas volantes com diferentes teores de bentonita (5%, 10% e 20%). Observou-se que o aumento do teor de bentonita acarretou uma redução na permeabilidade da mistura (na ordem de 10^{-6} cm/s). Contudo, a redução da permeabilidade da mistura foi menos significativa do que o esperado para uso como camada impermeabilizante. A provável explicação é que as interações entre as cinzas volantes, água e a bentonita teriam inibido a expansão da bentonita e também uma maior redução da permeabilidade.

Restrepo (2015) analisou o desempenho de misturas de resíduo de construção civil (RCC) e bentonita em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. As misturas RCC-bentonita ensaiadas apresentaram um comportamento predominantemente granular para os quais, os valores de condutividade hidráulica diminuíram com o acréscimo do teor de bentonita, sendo que somente o teor de 14% apresentou uma redução da condutividade hidráulica de 10^{-4} para 10^{-7} cm/s.

Ribeiro (2018) avaliou a possibilidade da utilização da borracha de pneu e do polietileno tereftalato (PET) para o melhoramento das propriedades de uma bentonita, visando o aumento nos parâmetros de resistência desta, para utilização em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, cisalhamento direto e adensamento unidimensional. A adição de borracha elevou os valores do intercepto coesivo e diminuiu o ângulo de atrito em todas as misturas. Houve um aumento da resistência ao cisalhamento como um todo. Com relação aos ensaios de adensamento unidimensional realizados para a bentonita pura e para as misturas com borracha e pneu, pode-se perceber que houve uma tendência de redução da compressibilidade do material com a variação de 5% para 10% de fibra de pneu inserida na amostra. Já para os ensaios envolvendo a adição de resíduo de PET à bentonita, notou-se, com o aumento percentual de PET, uma queda nas resistências de pico e residual. Foi possível constatar um aumento no intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito envolvendo todas as misturas com PET. Dos ensaios de adensamento, pode-se notar, em geral, um aumento no coeficiente de adensamento e uma redução na permeabilidade.

Wasil (2020) analisou misturas de cinza volante e bentonita, nas concentrações de 0%, 5%, 10% e 15%. Os resultados indicaram que a bentonita altera as propriedades das cinzas volantes e permite a obtenção de menores valores de condutividade hidráulica. A cinza volante

com adição de 15% de bentonita atingiu um valor de condutividade hidráulica adequado para a construção de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se um solo residual maduro de gnaiss, de ocorrência expressiva no território brasileiro. Em termos pedológicos, ele é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, aspecto poroso e granulometria argilo-arenoso-siltosa (RESENDE *et al.*, 2007). A escolha de tal solo se justifica uma vez que, por ser mais argiloso, este tem maior potencial de uso em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Porém, este solo foi estudado por Dias Neto (2020), o qual constatou que mesmo com o aumento da tensão de confinamento a níveis elevados (700 kPa), não foi obtido um valor de condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} cm/s, requerido em obras de impermeabilização de base de aterros sanitários.

As amostras deformadas do solo foram coletadas no horizonte B de um talude de corte na região de Viçosa-MG, dentro do campus da Universidade Federal de Viçosa, no mesmo local de coleta de Dias Neto (2020), conforme mostrado na Figura 5, que possui coordenadas geográficas de Latitude (20°45'8,9" S) e Longitude (42°51'30,1" W).

Figura 5: Vista do talude e do local de coleta das amostras de solo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após o transporte para o laboratório, as amostras de solo foram preparadas, de acordo com os ensaios a serem realizados, e armazenadas em recipientes e local apropriado.

3.1.2 Rejeito

O rejeito utilizado é proveniente da exploração de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais (MG) – Brasil. Este material, após passagem por processo de desaguamento em filtro prensa, é depositado em pilhas de rejeitos drenados. Após a coleta do material, este foi transportado para o laboratório, onde procedeu-se à sua secagem ao ar e preparação, de acordo com os ensaios a serem realizados, sendo, a seguir, armazenado em recipientes e local apropriado.

3.1.3 Bentonita

A bentonita utilizada para a realização dos ensaios foi uma bentonita sódica, comercializada pela empresa BRX Minérios para fins de aplicação em perfuração de poços, impermeabilização de solos e impermeabilização de aterros sanitários. A composição química da bentonita utilizada é apresentada no Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da bentonita.

Composto	Porcentagem (%)
SiO ₂	54,97
Al ₂ O ₃	22,53
Fe ₂ O ₃	3,90
Na ₂ O	2,12
K ₂ O	1,12
CaO	1,15
TiO ₂	0,01
MgO	1,70
Perda ao fogo	12,50

Fonte: BRX Minérios (2021).

3.1.4 Misturas solo-bentonita e rejeito-bentonita

Tanto para o solo quanto para o rejeito, os teores de bentonita adotados para a realização do estudo foram: 0%, 2%, 4%, 6% e 8%, em termos da massa seca do material utilizado.

Para a realização das misturas, após a preparação prévia do solo ou do rejeito, foi adicionada a quantidade de bentonita previamente calculada, procedeu-se, então, à homogeneização da mistura e, em seguida, foi adicionada a quantidade de água calculada. Após esse processo, as misturas umedecidas foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente protegidas e deixadas em repouso por um período de 48 horas, antes de serem utilizadas em ensaios de compactação ou no processo de moldagem dos corpos de prova (CPs) para os ensaios.

3.2 Métodos

Os ensaios de laboratório consistiram inicialmente dos ensaios para a caracterização geotécnica e mineralógica dos materiais e ensaios de compactação das misturas.

Para avaliação do efeito da bentonita como aditivo, no que diz respeito à condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e compressibilidade dos materiais empregados, foram realizados ensaios de permeabilidade, compressão triaxial adensados e não drenados (CIU) e adensamento com deformação controlada (Constant Rate Strain - CRS).

Com exceção dos ensaios de difração de raios-X, realizados no Laboratório de Física da Universidade Federal de Viçosa (UFV), todos os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS), do Departamento de Engenharia Civil da UFV (DEC/UFV).

3.2.1 Caracterização geotécnica e mineralógica

A caracterização geotécnica do solo, do rejeito, e da bentonita foi realizada conforme os ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentados na Tabela 2. As amostras utilizadas nos ensaios citados nesta tabela foram preparadas segundo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Tabela 2: Ensaios de caracterização geotécnica do solo.

Ensaio	Norma
Análise granulométrica conjunta	NBR 7181 (ABNT, 2016b)
Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016c)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016d)
Massa específica real dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016e)

Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras de solo, rejeito e bentonita foram classificadas de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), conforme a norma D2487-17e1 (ASTM, 2017).

A classificação geotécnica de solos tropicais pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi realizada a partir dos resultados dos ensaios de Compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão (Pi), de acordo com as normas ME 258/1994 (DNER, 1994a) e ME 256/1994 (DNER, 1994b), respectivamente.

As análises mineralógicas do solo tropical, do rejeito e da bentonita foram realizadas por meio de difratometria de raios-X, em amostras preparadas conforme procedimento da Embrapa (2017). Foi utilizado um sistema de difração D8-Discover, fabricante BRUKER, equipado com tubo de cobre (1,5418 angstrom), espelho de Goebel e fenda de 1 mm. Foi feita medida 2θ - 2θ na faixa de 5 a 80 graus, utilizando passo de 0,05 graus, 1 segundo por passo.

3.2.2 Compactação das misturas

Foram realizados ensaios de compactação nas amostras de solo tropical, rejeito e suas misturas com bentonita, conforme descrito no item 3.1.4. As amostras foram previamente preparadas segundo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016a), sendo o ensaio de compactação realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016f), na energia Proctor Normal.

Os parâmetros de umidade ótima e peso específico seco máximo foram adotados como referência para moldagem dos CPs dos demais ensaios.

3.2.3 Ensaios de condutividade hidráulica

Todos os ensaios de condutividade hidráulica, tanto para os materiais puros quanto para as misturas, foram realizados em permeâmetro de parede flexível, à carga constante, e o método de ensaio foi executado conforme a norma D5084-16a (ASTM, 2016). A adoção desse tipo de ensaio justifica-se pela redução do tempo de percolação em solos argilosos pouco permeáveis, além de possibilitar a saturação dos CPs pelo processo de contrapressão.

Foram utilizados CPs com 5,04 cm de diâmetro e 10,1 cm de altura, os quais, após moldagem, foram saturados por meio da aplicação de incrementos de contrapressão, mantendo-se uma diferença de 10 kPa entre a tensão aplicada na câmara e a da linha de contrapressão.

Na Figura 6 é ilustrada a aparelhagem utilizada e o processo de moldagem dos CPs para os ensaios de permeabilidade e triaxiais, no qual foi utilizado o processo de compressão estática dos materiais dentro de um cilindro bipartido. Para uma melhor homogeneidade dos CPs, a

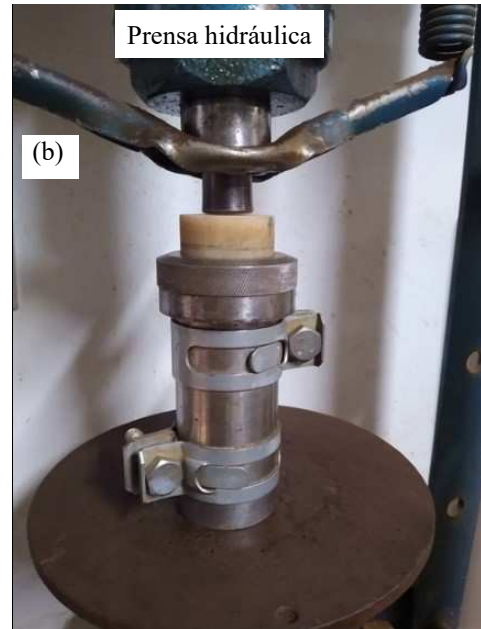
quantidade de material necessária para cada corpo de prova (CP) foi dividida em 4 partes, sendo então realizada a compactação em 4 camadas dentro do cilindro.

Figura 6: Detalhe da aparelhagem e da moldagem dos CPs.

(a) Aparelhagem utilizada para a moldagem dos CPs para os ensaios de permeabilidade e triaxiais.



(b) Moldagem de um CP por compressão estática dentro do cilindro bipartido.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a moldagem, os CPs foram montados na câmara de ensaio e procedeu-se à sua saturação por meio do emprego de incrementos de contrapressão. O processo de saturação foi avaliado por meio do parâmetro B de Skempton (Equação 1), que relaciona a variação de pressão de água intersticial (Δu) com o incremento de pressão gerado na câmara ($\Delta \sigma_3$). Os CPs utilizados nos ensaios apresentaram parâmetro B igual ou superior a 0,97, sendo que segundo a norma D5084-16a (ASTM, 2016), um CP pode ser considerado adequadamente saturado quando $B \geq 0,95$.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (1)$$

Depois de confirmada a saturação do CP, foi iniciada a fase de determinação da condutividade hidráulica, que foi realizada em CPs sem adensamento e adensados com tensões de 75, 150, 300 e 600 kPa.

Para a determinação da condutividade hidráulica dos CPs adensados, procedeu-se inicialmente à consolidação isotrópica dos mesmos sob as tensões confinantes de 75, 150, 300 e 600 kPa, por um período de 24 horas.

A determinação da condutividade hidráulica foi realizada pelo monitoramento do volume de água percolado ao longo do tempo, a partir da média de 4 determinações relativamente próximas, as quais não apresentaram tendências evidentes de crescimento ou diminuição.

A Lei de Darcy foi assumida válida nesse ensaio e a condutividade hidráulica foi calculada pela Equação 2, para um gradiente hidráulico de aproximadamente 10, aplicado por meio de uma diferença de 10 kPa entre a base e o topo do CP (fluxo ascendente).

$$k = \frac{Q}{i \cdot A} \quad (2)$$

Em que: k é a condutividade hidráulica; Q é a vazão percolada; i é o gradiente hidráulico; A é a área da seção transversal do CP.

Ao longo do ensaio, além do monitoramento do volume de água percolado, foi realizado também o registro da variação da temperatura da água. Esse procedimento, recomendado pela norma D5084-16a (ASTM, 2016), visa corrigir a condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k) para a condutividade hidráulica a 20°C (k_{20}), pelas Equações 3 e 4.

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (3)$$

$$R_T = \frac{2,2902 \cdot (0,9842^T)}{T^{0,1702}} \quad (4)$$

Em que: k_{20} é a condutividade hidráulica corrigida para a temperatura de 20°C; R_T é a razão entre a viscosidade da água na temperatura do ensaio e a viscosidade da água a 20°C; k é a condutividade hidráulica; T é a média das temperaturas da água no início e no fim da aplicação do fluxo.

3.2.4 Ensaios de compressão triaxial

Para a avaliação da resistência ao cisalhamento dos materiais e das misturas foi adotado o ensaio de compressão triaxial do tipo adensado e não drenado, com adensamento isotrópico dos CPs antes da fase de carregamento (CIU). A realização dos ensaios seguiu a metodologia recomendada na norma D4767-11 (ASTM, 2011). A adoção desse tipo de ensaio justifica-se por permitir a obtenção de envoltórias de resistência em termos de tensões totais e de tensões efetivas, além de representar a situação de uma camada de material de baixa permeabilidade submetida a uma solicitação relativamente rápida, com geração de poropressões (similar ao que ocorre durante o enchimento de um aterro sanitário).

Os CPs para os ensaios de compressão triaxial foram moldados utilizando o mesmo procedimento adotado para os ensaios de permeabilidade, conforme descrito na seção 3.2.3 e ilustrado na Figura 6.

Na Figura 7 é mostrado um detalhe da execução de um ensaio de compressão triaxial em um CP das misturas estudadas.

Figura 7: Detalhe da execução de um ensaio de compressão triaxial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os CPs foram consolidados isotropicamente (fase de adensamento), sob as tensões confinantes de 75, 150, 300 e 600 kPa, e foram levados à ruptura pelo incremento da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$), com velocidade de 0,010 mm/min, impedindo a drenagem dos CPs durante a fase de cisalhamento.

Como critério de ruptura, foi adotada a ocorrência da máxima diferença entre as tensões principais (máxima tensão desviadora) ou pela tensão desviadora à deformação axial

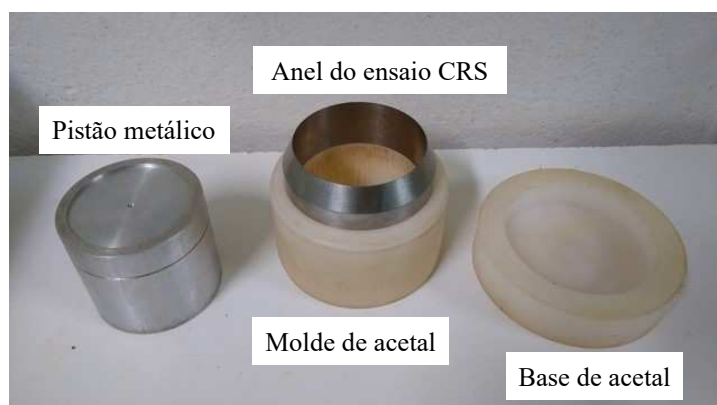
equivalente a 15%, o que ocorreu primeiro nas curvas geradas ao longo do ensaio. Além disso, excessos de poropressão gerados durante essa fase foram registrados para a determinação dos parâmetros de resistência em termos das tensões efetivas.

3.2.5 Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS)

Para avaliação das propriedades de compressibilidade dos materiais e das misturas, foram realizados ensaios edométricos de adensamento com deformação controlada (CRS), conforme a metodologia descrita na norma D4186/D4186M (ASTM, 2012).

Os CPs foram obtidos por compressão estática dos materiais puros e das misturas, com base nos respectivos parâmetros de compactação (umidade ótima e peso específico seco máximo), em um molde de acetal, no interior do qual, se encontrava o anel da célula de adensamento CRS, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Detalhe da aparelhagem utilizada para a moldagem dos CPs para o ensaio CRS.

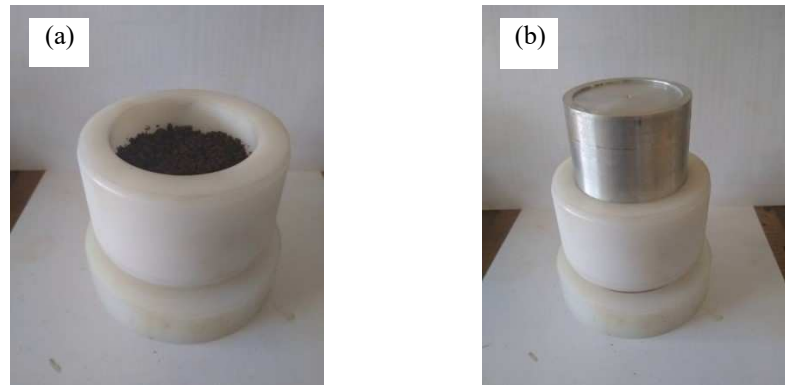


Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme ilustrado na Figura 9, após a colocação do material no molde, foi posicionado sobre o mesmo o pistão metálico, por meio do qual foi realizada a compressão estática.

Após a montagem do conjunto ilustrado na Figura 9-b, este foi levado na mesma prensa hidráulica utilizada para a moldagem dos CPs para os ensaios de permeabilidade e triaxiais, sendo a seguir realizada a aplicação de carga no pistão metálico, até que o CP atingisse a altura desejada (Figura 10-a).

Figura 9: Detalhes da colocação do material no molde e posicionamento do pistão metálico para compressão.
 (a) Molde com o material e (b) Molde com o pistão metálico utilizado na compressão estática do material.

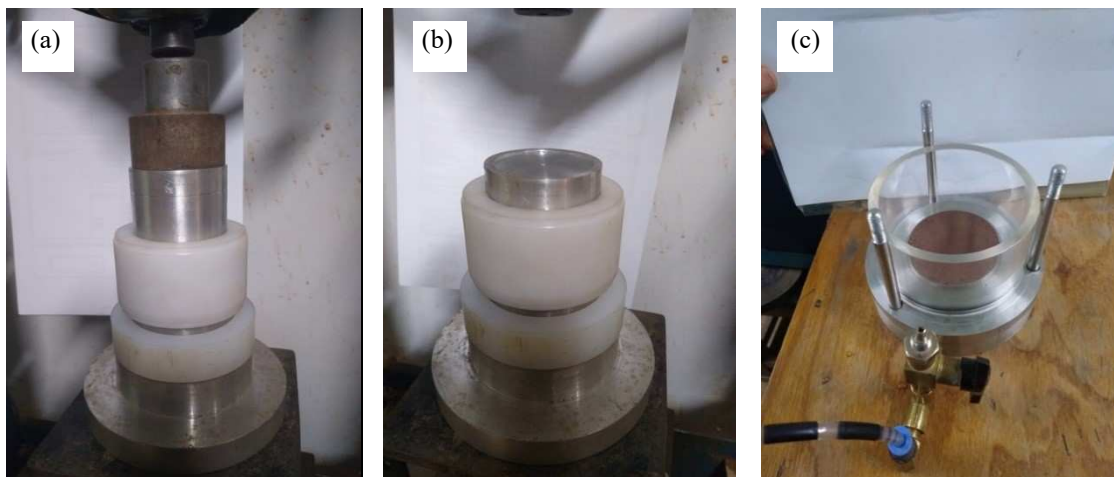


Fonte: Elaborado pela autora.

Após a compressão do material, procedeu-se à retirada do anel do interior do molde com o material compactado, sendo a seguir rasado o topo e a base, antes da colocação do anel com o CP na célula CRS. Na Figura 10 são ilustradas as etapas de compressão do material no anel e da montagem do CP na base na célula do ensaio CRS. Após esse processo, fechou-se a célula, e procedeu-se ao seu enchimento com água e à inundação do CP.

Figura 10: Compressão e montagem do CP na célula do ensaio CRS.

(a) Compressão do material, (b) Final da compressão e (c) Anel com o CP após montagem na célula.



Fonte: Elaborado pela autora.

A etapa inicial de saturação dos CPs consistiu na percolação de água através dos mesmos, sob uma pressão de 0,5 mca, durante um período mínimo de 24 horas ou até não se observar a saída de bolhas de ar na água acima dele. A seguir, foi aplicada uma contrapressão de 300 kPa, que foi deixada atuar por um período mínimo de 24 horas.

Após os procedimentos anteriores, a célula do ensaio CRS foi colocada na prensa, sendo a seguir ajustada a velocidade de deslocamento do prato da prensa, a qual, segundo a norma D4186/D4186M (ASTM, 2012), deve ser escolhida de forma a gerar uma razão de excesso de poropressão na base do CP, R_u , (Equação 5) entre 3% e 15% no intervalo normalmente adensado do ensaio. Nos ensaios realizados nessa pesquisa, a velocidade de 0,05 mm/min permitiu atender a essa recomendação. Durante a fase de carregamento foram realizadas leituras referentes à força vertical aplicada ao CP, ao deslocamento vertical de seu topo, à poropressão gerada na base e ao tempo transcorrido desde o início do ensaio.

$$R_u = \frac{u_b}{\sigma_v} \quad (5)$$

Em que: R_u é a razão de excesso de poropressão na base do CP, u_b é o excesso de poropressão e σ_v é a tensão vertical total atuante.

Na Figura 11 é ilustrada a célula CRS após colocação na prensa e executados os preparativos para a execução do ensaio.

Figura 11: Detalhe da célula CRS após colocação na prensa e preparativos para a execução do ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais de estudo

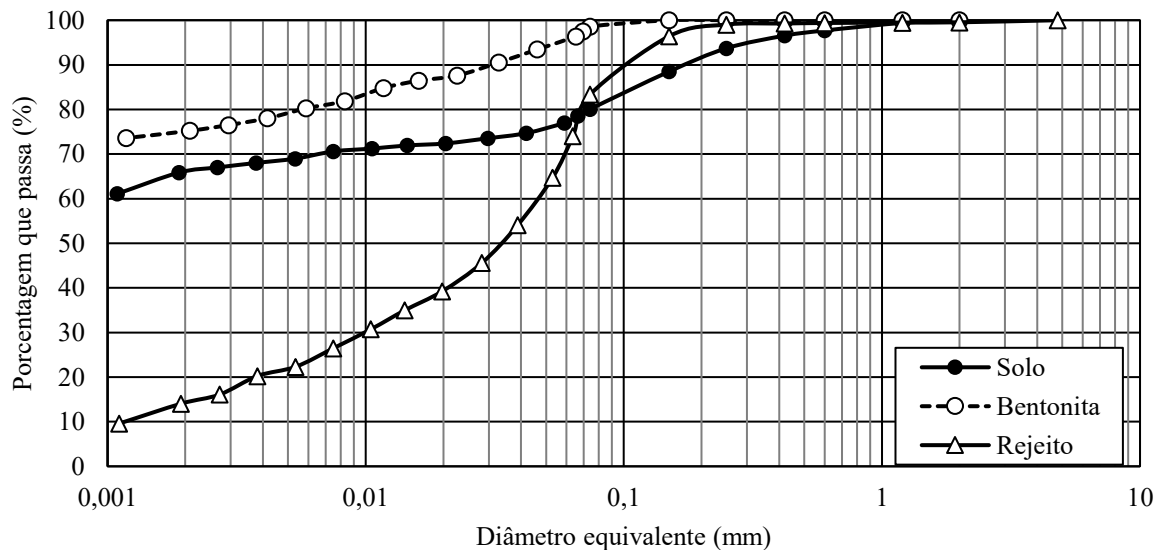
Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa e, na Figura 12, suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais.

Parâmetro	Material		
	Solo	Bentonita	Rejeito
Massa específica dos sólidos - ρ_s (g/cm ³)	2,830	2,865	3,341
Peso específico dos sólidos - γ_s (kN/m ³)	27,75	28,10	32,76
Limite de liquidez - LL (%)	80	441	26
Limite de plasticidade - LP (%)	42	43	16
Índice de plasticidade - IP = LL - LP	38	398	10
Granulometria			
Fração argila (%) - $D_{particula} < 0,002$ mm	66	75	14
Fração silte (%) - $0,002$ mm $< D_{particula} < 0,060$ mm	11	21	57
Fração areia (%) - $0,060$ mm $< D_{particula} < 2,00$ mm	23	4	28
Fração pedregulho (%) - $D_{particula} > 2,00$ mm	0	0	1
Atividade de Skempton - $A_c = IP / \% < 0,002$ mm	0,58	5,31	0,71

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12: Curvas granulométricas dos materiais.



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização, e tomando como referência o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo puro foi classificado como um silte de alta compressibilidade (MH), o rejeito como uma argila de baixa compressibilidade (CL) e a bentonita como uma argila de alta compressibilidade (CH). Com relação a esta classificação, verifica-se que, no caso do solo, apesar deste ser constituído por uma maior quantidade de partículas de fração argila (66%), seu comportamento para fins de engenharia é de um silte de alta compressibilidade (MH). Por outro lado, o rejeito, cuja fração silte é de 57%, possui comportamento de uma argila de baixa compressibilidade (CL). Portanto, essas observações evidenciam o fato de que para uma correta avaliação do comportamento de engenharia dos materiais, deve-se considerar não somente sua constituição granulométrica, mas também os valores de seus limites de consistência.

Com relação à atividade de Skempton (A_c), segundo Pinto (2006), a argila presente em um solo pode ser classificada como: inativa, quando o valor de A_c for inferior a 0,75; normal, quando o valor de A_c se encontrar entre 0,75 e 1,25; e ativa quando o valor de A_c for superior a 1,25. Portanto, para os materiais utilizados nesta pesquisa, tanto a fração argila presente no solo quanto no rejeito pode ser considerada inativa, tendo em vista os valores de 0,58 e 0,71, respectivamente. No caso da bentonita, sua fração argila apresentou um valor de A_c típico de solos ativos (5,31), confirmando, dessa forma, seu caráter expansivo.

Com a intenção de avaliar o comportamento laterítico do solo analisado, este foi classificado de acordo com a metodologia MCT, cujos resultados são apresentados na Tabela 4. A partir dos valores dos parâmetros apresentados, verifica-se que o solo se enquadrou no grupo LG', tratando-se, portanto, de um solo argiloso laterítico.

Tabela 4: Parâmetros referentes à classificação geotécnica MCT.

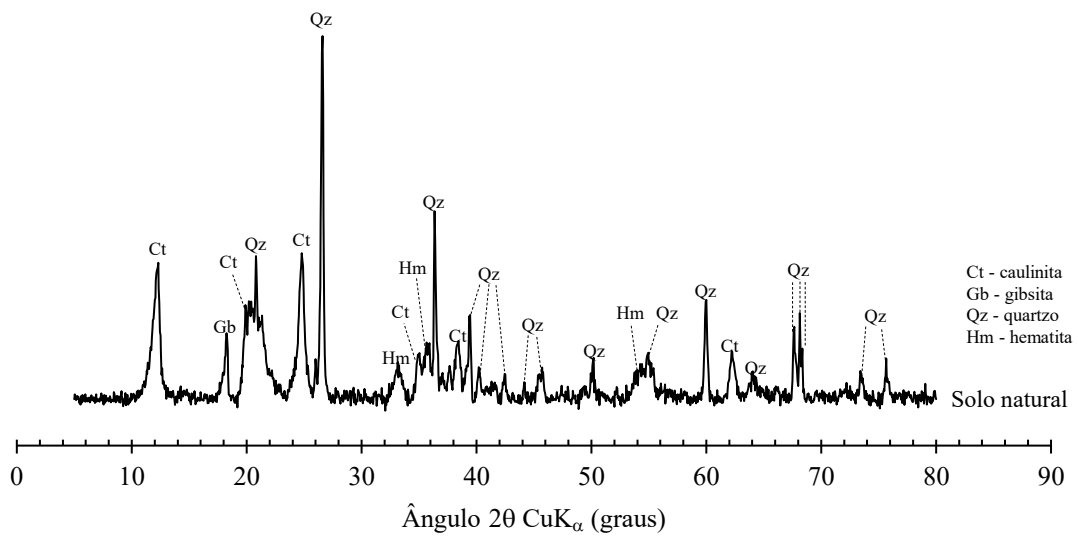
Parâmetro	Valor
Coefficiente de deformabilidade (c')	2,124
Coefficiente (d')	51,300
Perda de massa por imersão em água (%)	100
Mini MCV	10
Índice (e')	1,116
Grupo MCT	LG'
Classificação MCT	Solo argiloso laterítico

Fonte: Elaborado pela autora.

Nas Figuras 13, 14 e 15 são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de difração de raios-X realizados nas amostras de solo, bentonita e rejeito de minério de ferro, respectivamente, com a identificação dos principais minerais presentes.

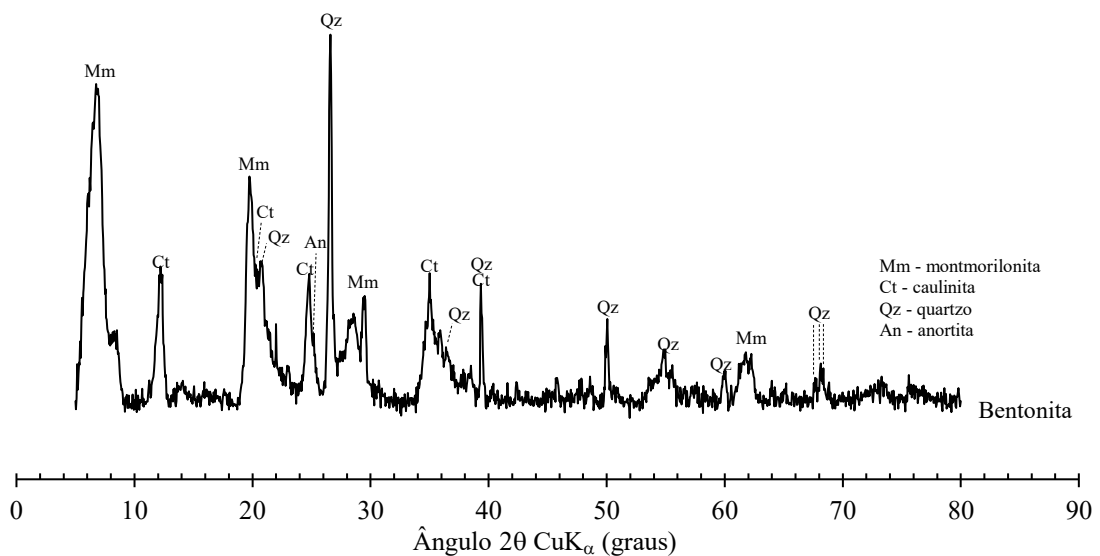
Conforme pode ser observado, tanto no solo quanto no rejeito, os principais minerais identificados são de baixa expansão, o que confirma os valores de A_C obtidos para eles. No caso da bentonita, o difratograma mostra a presença de picos de montmorilonita, que é um argilomineral de elevada expansibilidade, confirmando, dessa forma, seu elevado valor de A_C .

Figura 13: Resultado da difração de raios-X do solo.



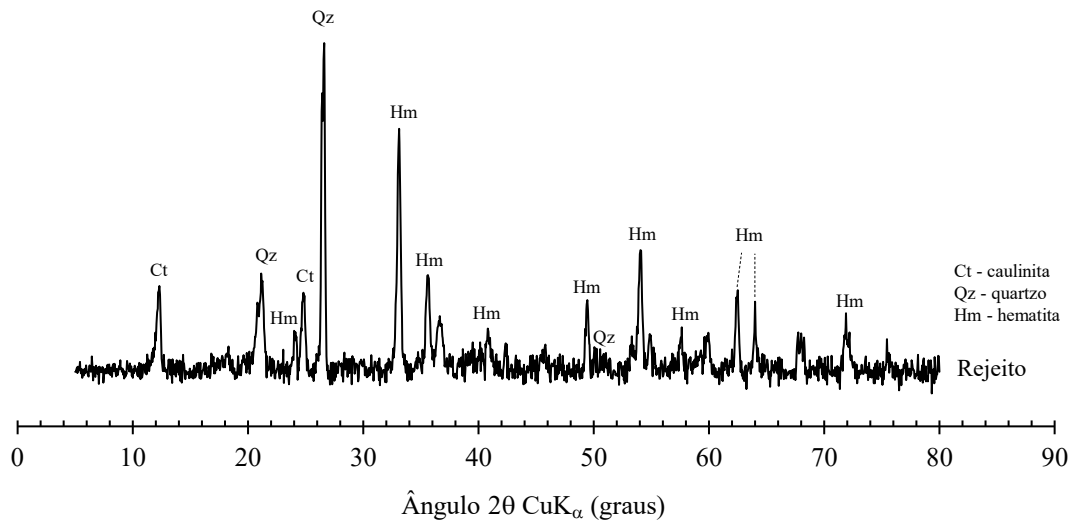
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14: Resultado da difração de raios-X da bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15: Resultado da difração de raios-X do rejeito de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Ensaios com o solo puro e suas misturas com bentonita

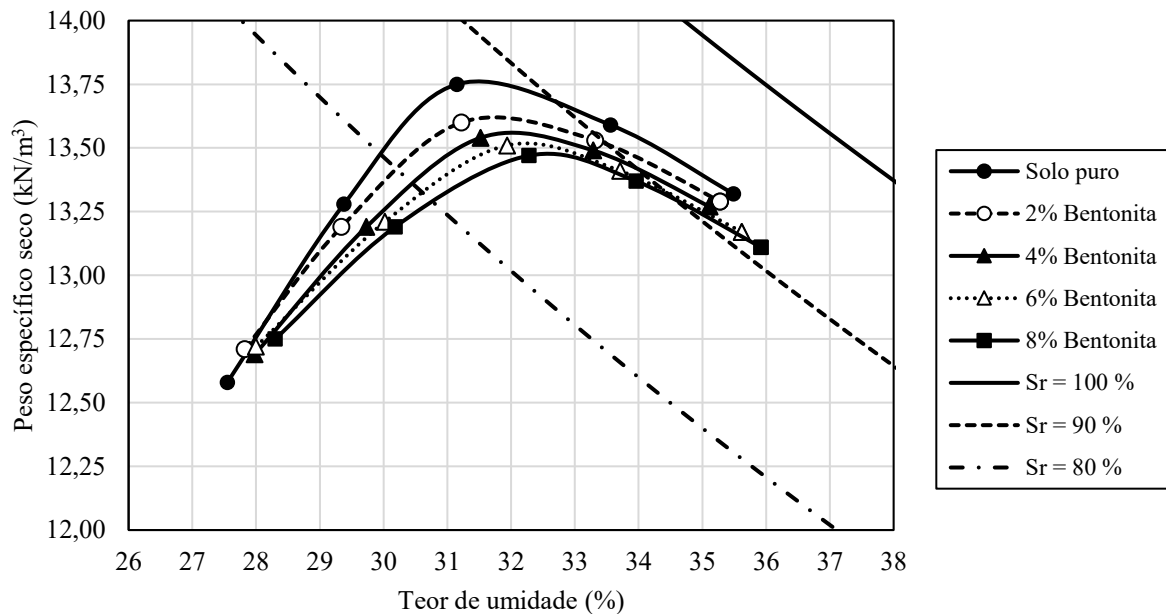
Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o solo puro e com suas misturas com bentonita.

4.2.1 Ensaios de compactação (Solo-Bentonita)

Na Figura 16 são apresentadas as curvas de compactação do solo e de suas misturas com bentonita, sendo que na Tabela 5 se encontram os respectivos parâmetros de compactação.

Conforme pode ser observado, a adição de bentonita ao solo provocou alterações dos parâmetros de compactação, caracterizados pelo teor de umidade ótimo e pelo peso específico seco máximo. Verifica-se que com o aumento do teor de bentonita tem-se um ligeiro aumento do teor de umidade ótimo e redução do peso específico seco máximo. De acordo com Silva (2015), o aumento do teor de umidade ótimo é atribuído à forte presença de cátions trocáveis Na^+ disponíveis na bentonita utilizada na pesquisa, os quais estimulam a adsorção de moléculas de água em torno de cada partícula e entre as suas camadas estruturais durante a fase de homogeneização da umidade da mistura. Já a redução do peso específico seco máximo se deve não só à elevação da umidade ótima, mas também ao aumento do teor de finos com a adição de bentonita.

Figura 16: Curvas de compactação do solo e das misturas com bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5: Parâmetros de compactação do solo e das misturas com bentonita.

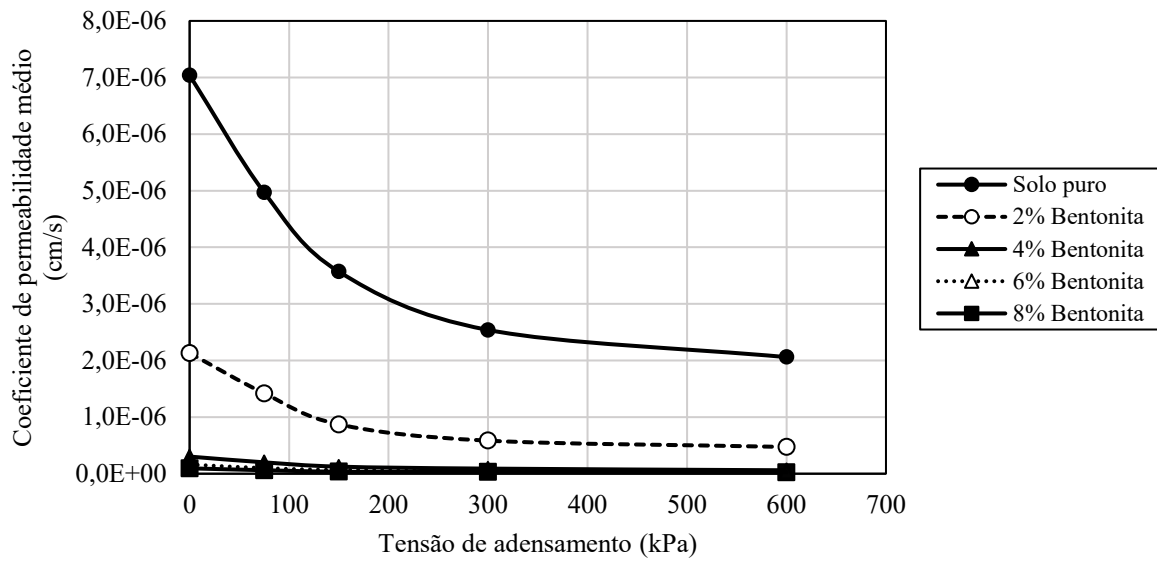
Teor de bentonita (%)	Teor de umidade ótimo (%)	Peso específico seco máximo (kN/m³)
0	31,3	13,76
2	31,6	13,62
4	31,9	13,56
6	32,2	13,52
8	32,5	13,48

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Ensaios de condutividade hidráulica (Solo-Bentonita)

Na Figura 17 é apresentada a variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão em que foram adensados os corpos de prova (CPs), sendo que na Tabela 6 se encontram os respectivos valores desse parâmetro.

Figura 17: Coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6: Coeficiente de permeabilidade (cm/s) em função do teor de bentonita e do nível de tensão.

Teor de bentonita (%)	Tensão de adensamento (kPa)				
	0	75	150	300	600
0	7,04E-06	4,97E-06	3,57E-06	2,54E-06	2,06E-06
2	2,13E-06	1,42E-06	8,72E-07	5,84E-07	4,73E-07
4	3,03E-07	2,01E-07	1,25E-07	9,00E-08	6,11E-08
6	1,63E-07	9,93E-08	6,71E-08	4,92E-08	3,38E-08
8	9,54E-08	6,15E-08	3,64E-08	3,04E-08	2,56E-08

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a variação da condutividade hidráulica com o acréscimo da bentonita ao solo tropical apresentou-se dentro do comportamento previsto em estudos anteriores (CAMARGO; SILVA; BASTOS, 2012; KAVYA e ANJANA, 2016; LUKIANTCHUKI e ESQUIVEL, 2010; MORANDINI e LEITE, 2015; PRONGMANEE *et al.*, 2021; SILVA, 2015), uma vez que o coeficiente de permeabilidade se apresentou menor para os maiores teores de bentonita utilizados nas misturas. Conforme Silva (2015), entende-se que esta mudança no comportamento hidráulico está relacionada ao preenchimento dos vazios intersticiais do solo pelo argilomineral de caráter expansivo, reduzindo, dessa forma, o tamanho dos poros interligados que conduzem o fluxo.

A maioria das legislações vigentes para a construção de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, especifica 10^{-7} cm/s como valor máximo de condutividade hidráulica para solos compactados. Nos ensaios realizados em CPs não adensados, o teor de bentonita que

reduziu a condutividade hidráulica a níveis aceitáveis foi 8%, sendo, portanto, recomendado para construção de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. O solo puro e as misturas a 2%, 4% e 6% ficaram acima dos valores de condutividade hidráulica desejáveis para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

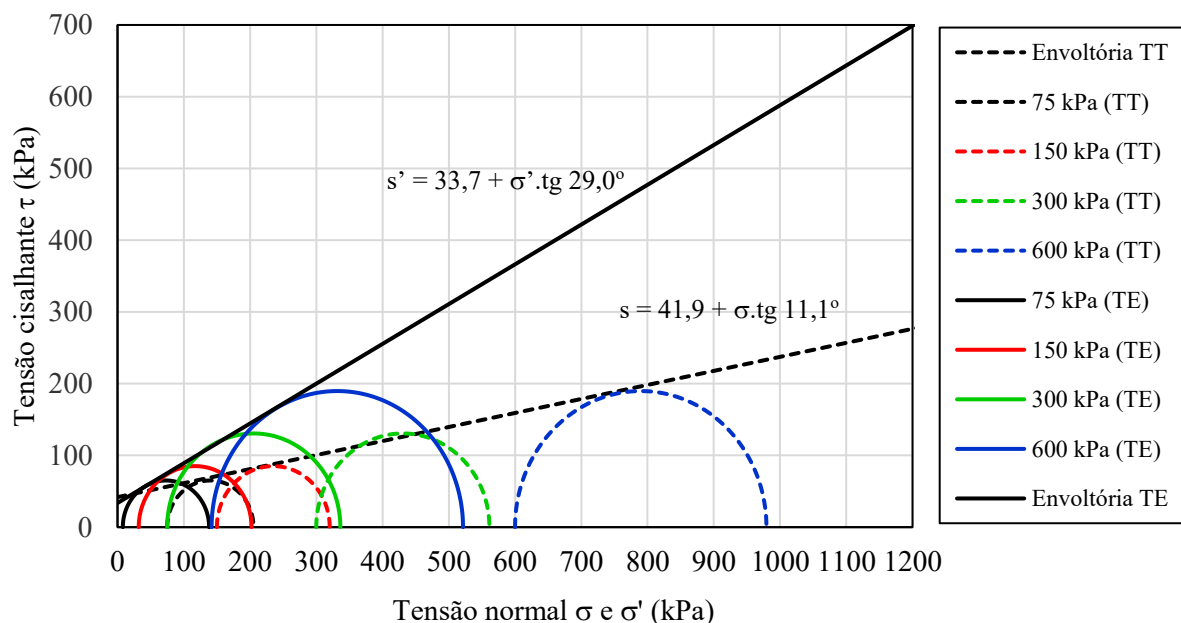
Uma outra observação foi a relacionada à redução do coeficiente de permeabilidade com o aumento da tensão de adensamento, o que pode ser explicado pela redução do índice de vazios causada pelo aumento desta tensão. Entretanto, observou-se que para as amostras de solo puro, mesmo com a maior tensão de adensamento utilizada nesta pesquisa (600 kPa), não foi possível a obtenção de um valor de condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} cm/s.

Quando se consideram os ensaios em CPs adensados das misturas, foi possível obter valores inferiores a 10^{-7} cm/s somente com o teor de 4%, em CPs adensados a partir de 300 kPa, e com o teor de 6%, em CPs adensados a partir de 75 kPa.

4.2.3 Ensaios de resistência ao cisalhamento (Solo-Bentonita)

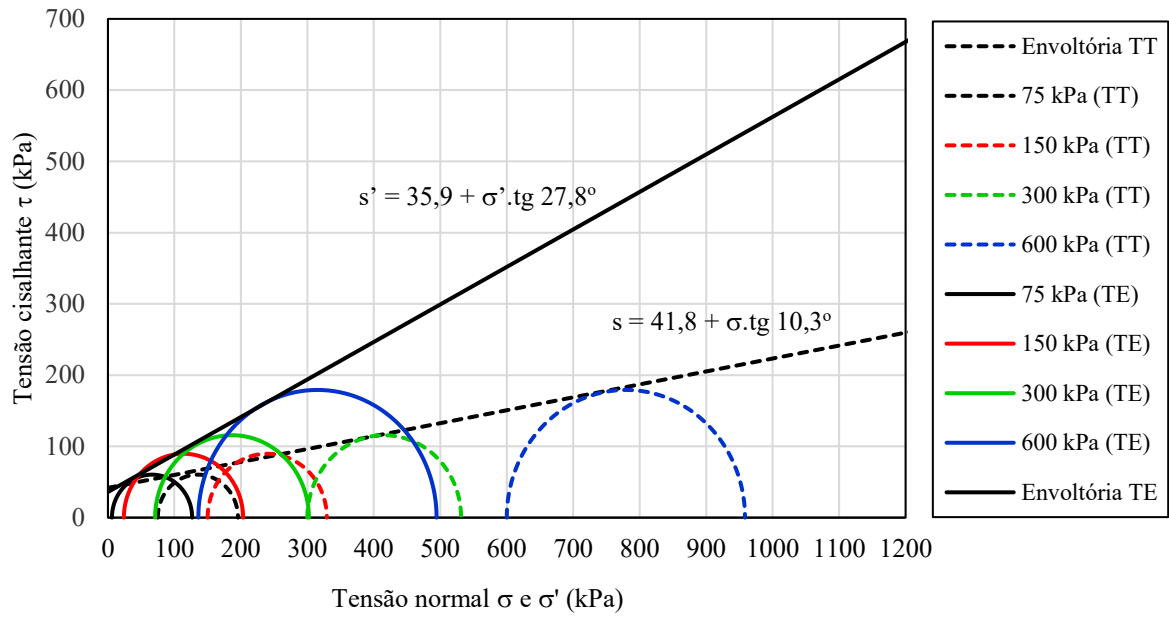
Nas Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 são apresentados os círculos de Mohr e as envoltórias de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões totais e de tensões efetivas, do solo puro e de suas misturas com bentonita.

Figura 18: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo puro.



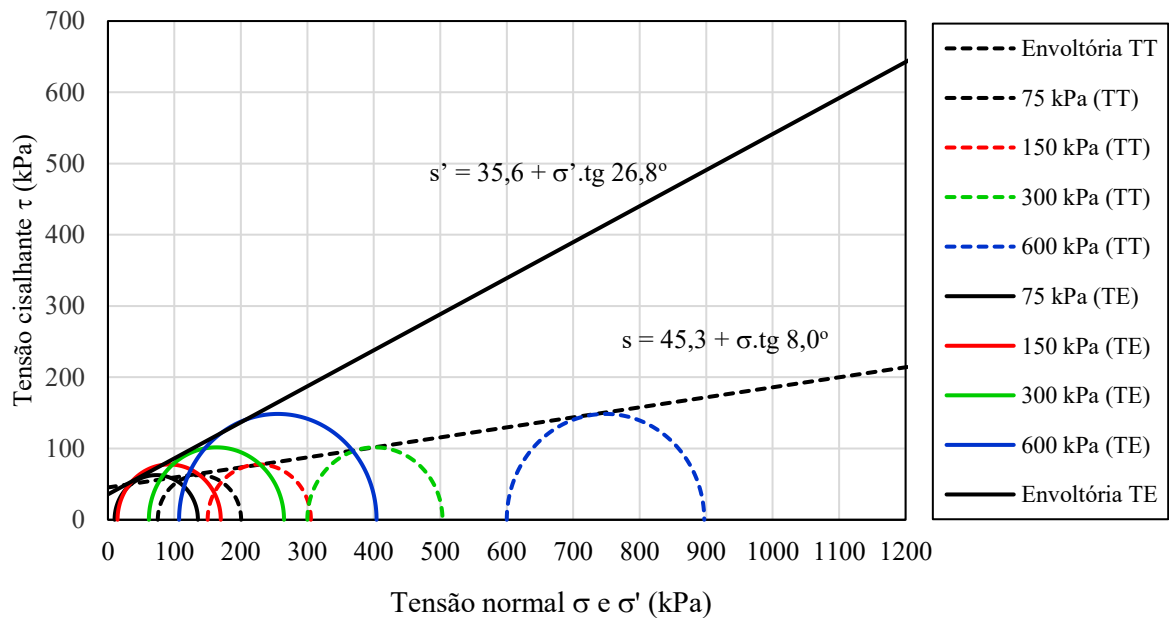
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 2% de bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 4% de bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 6% de bentonita.

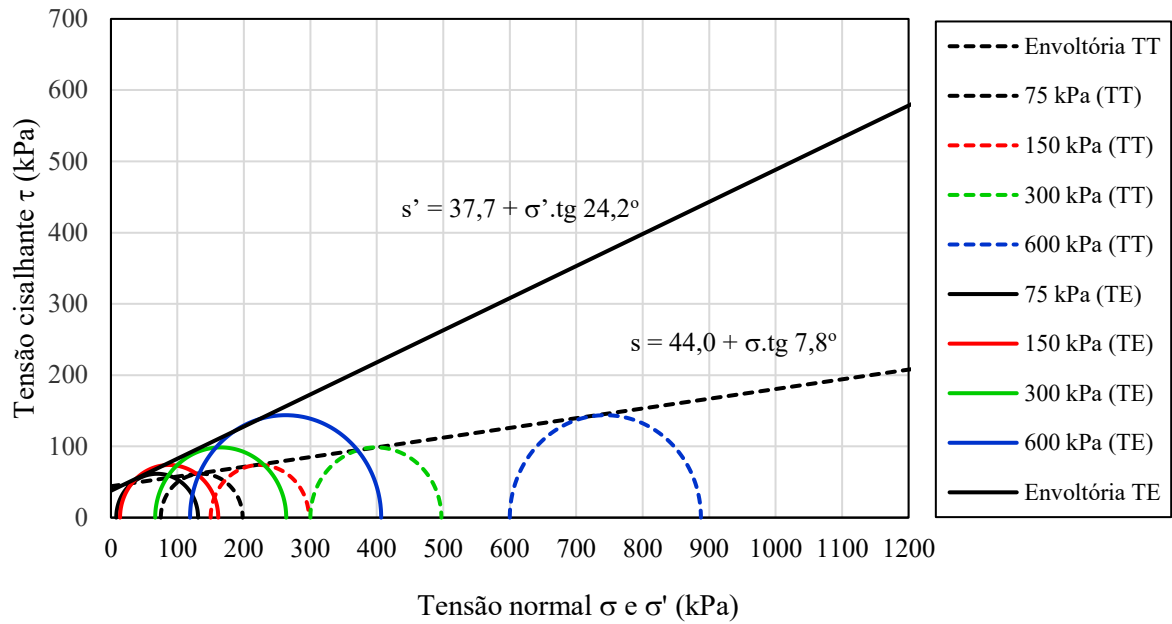
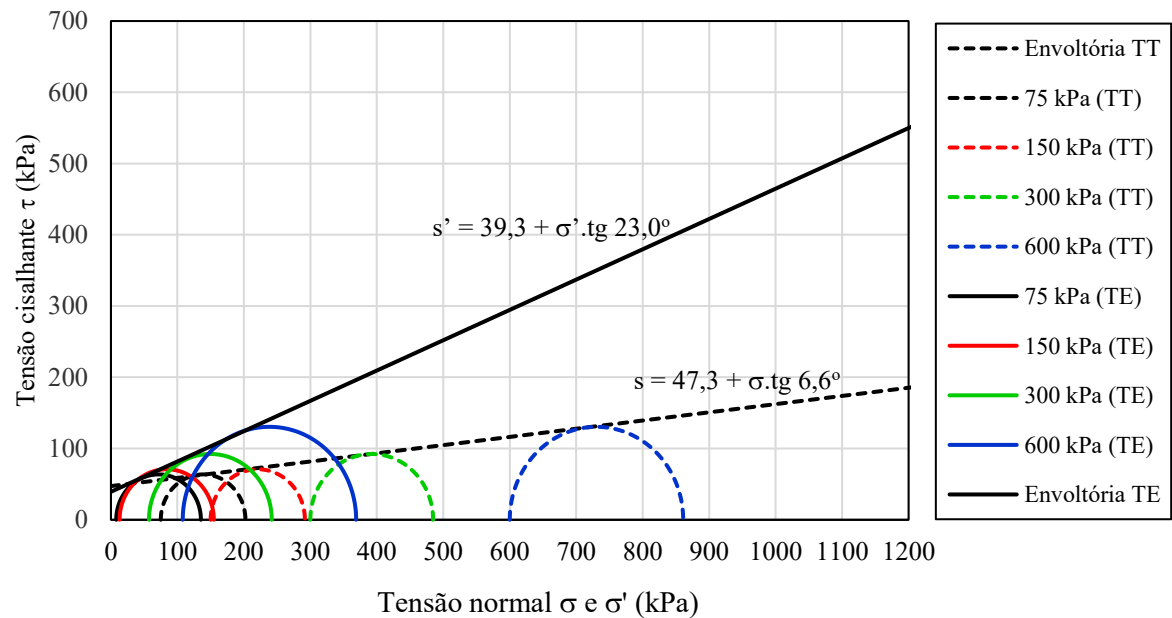


Figura 22: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo com 8% de bentonita.



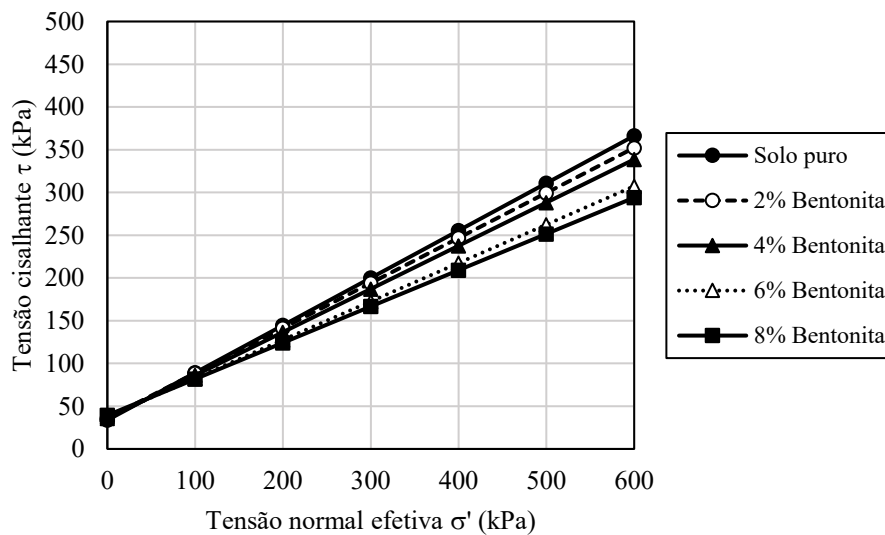
Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e de suas misturas com bentonita, em termos de tensões efetivas, enquanto na Figura 23 é apresentado um comparativo entre as envoltórias.

Tabela 7: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do solo puro e misturas.

Parâmetro de resistência	Teor de bentonita (%)				
	0	2	4	6	8
Intercepto de coesão (kPa)	33,7	35,9	35,6	37,7	39,3
Ângulo de atrito (graus)	29,0	27,8	26,8	24,2	23,0

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do solo puro e misturas.

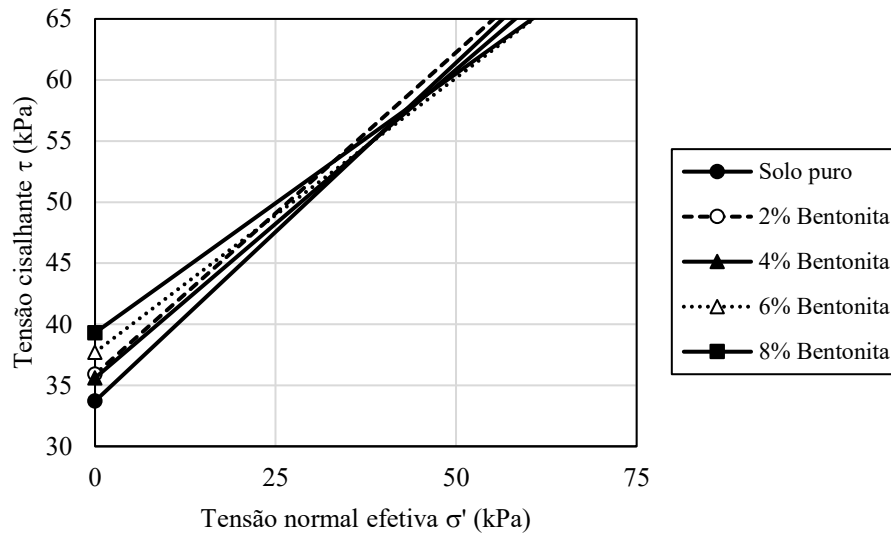


Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados apresentados, observa-se que, no geral, houve uma tendência de redução da resistência ao cisalhamento com a adição de bentonita ao solo tropical laterítico, apesar de haver um relativo aumento dessa resistência para baixos níveis de tensões, conforme ilustrado na Figura 24. Isso ocorre devido à influência da parcela coesiva nesse nível de tensões, cuja contribuição torna-se cada vez menos pronunciada com o aumento do nível de tensões, devido à redução do ângulo de atrito interno efetivo das misturas.

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e de suas misturas com bentonita, em termos de tensões totais, enquanto na Figura 25 é apresentado um comparativo entre as envoltórias.

Figura 24: Detalhe das envoltórias em termos de tensões efetivas para baixos níveis de tensões.



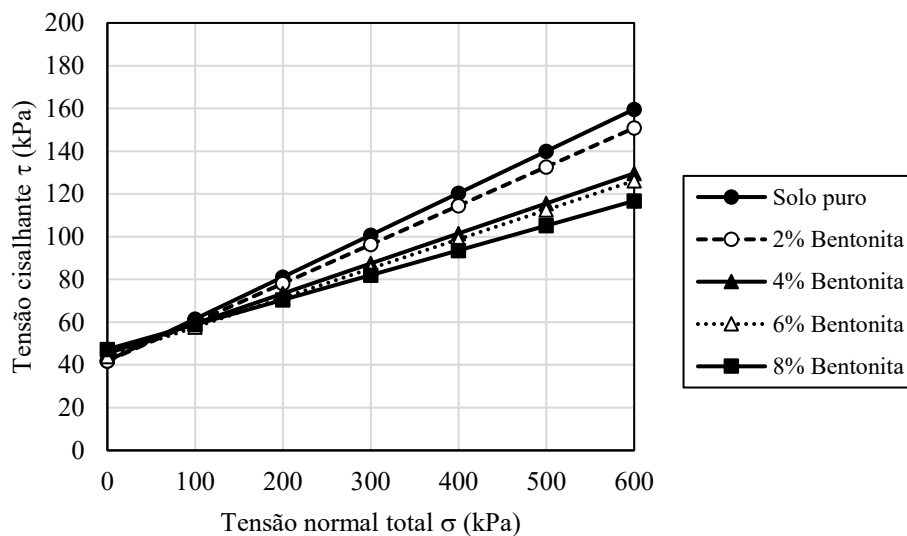
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do solo puro e misturas.

Parâmetro de resistência	Teor de bentonita (%)				
	0	2	4	6	8
Intercepto de coesão (kPa)	41,9	41,8	45,3	44,0	47,3
Ângulo de atrito (graus)	11,1	10,3	8,0	7,8	6,6

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do solo puro e misturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais, cujo comportamento foi muito similar ao observado em termos de tensões efetivas, conclui-se que também houve uma tendência de redução dessa resistência com a adição de bentonita ao solo tropical laterítico.

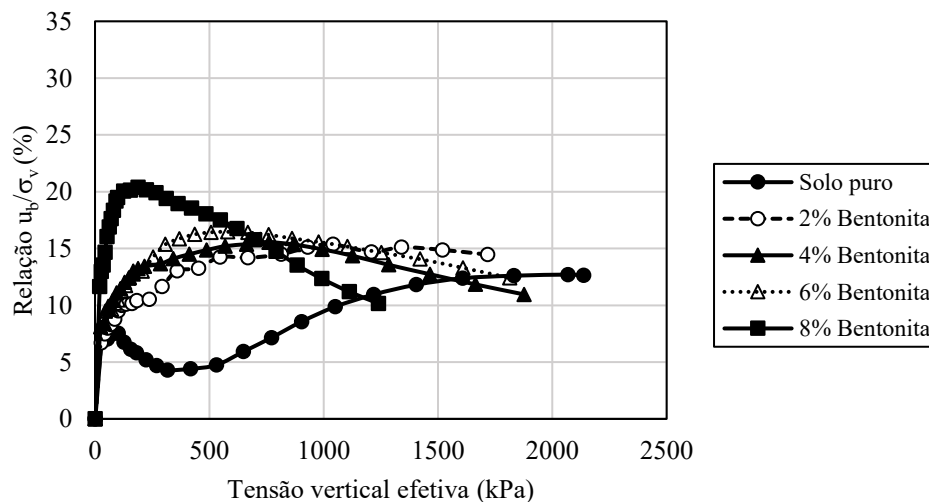
Tal comportamento está de acordo com o que é encontrado na literatura, uma vez que também foram relatadas reduções na resistência ao cisalhamento em decorrência da adição de bentonita por Morandini e Leite (2015), os quais também analisaram o comportamento de um solo tropical laterítico misturado a diferentes teores de bentonita.

Dessa forma, pode-se observar a importância do estudo da resistência ao cisalhamento dos materiais que têm a finalidade de utilização como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários, uma vez que caso não seja analisado esse aspecto, o comportamento dessas camadas pode ser afetado negativamente.

4.2.4 Ensaios de adensamento CRS (Solo-Bentonita)

Na Figura 26 são apresentadas as variações da razão R_u (u_b/σ_v) em função da tensão vertical atuante para os ensaios CRS realizados com o solo puro e com suas misturas com bentonita. Conforme pode ser observado nesta figura, em praticamente todos os ensaios houve uma tendência inicial de aumento da razão R_u , permanecendo, no entanto, na fase normalmente adensada do material, a se situar no intervalo entre 3% e 15%, conforme recomendado pela D4186/D4186M (ASTM, 2012).

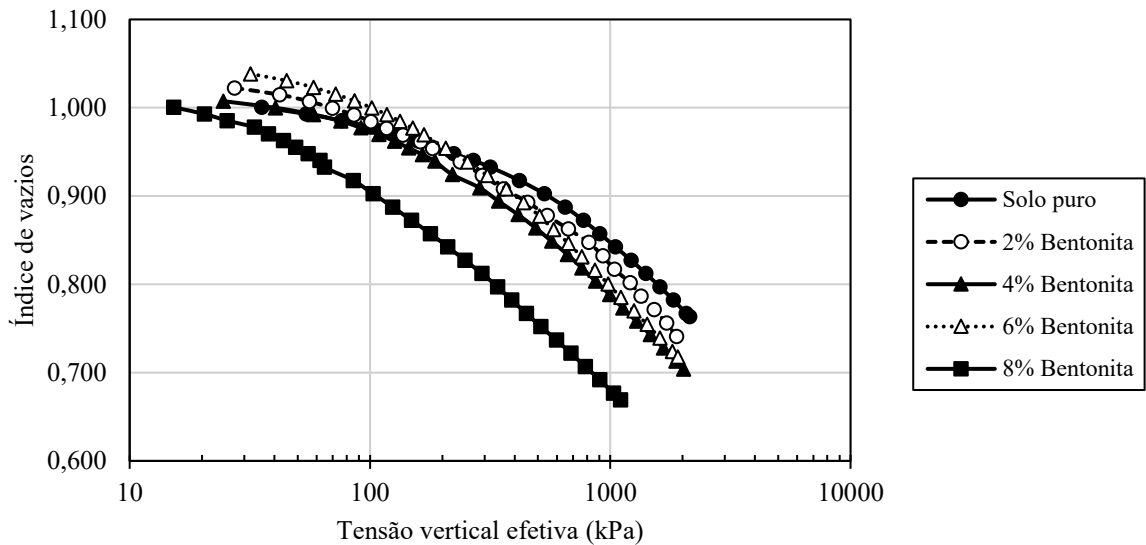
Figura 26: Variação da razão R_u (u_b/σ_v) com a tensão vertical efetiva nos ensaios CRS com o solo e misturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

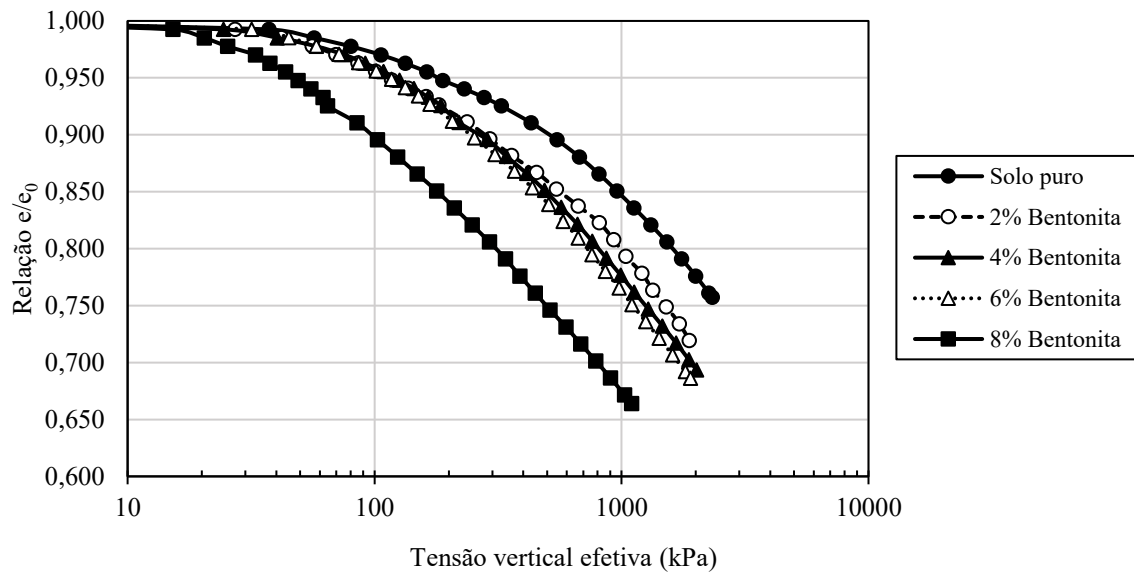
Na Figura 27 são apresentadas as curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva obtidas no ensaio CRS. Conforme pode ser observado, com o aumento do teor de bentonita, tem-se um aumento da compressibilidade da mistura. Esse aumento de compressibilidade fica mais evidenciado na Figura 28, onde são apresentadas as curvas de tensão vertical efetiva em função da relação e/e_0 , onde “e” se refere ao índice de vazios para um determinado valor de tensão e “ e_0 ” ao índice de vazios inicial do CP ensaiado.

Figura 27: Curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva no ensaio CRS.



Fonte: Elaborado pela autora.

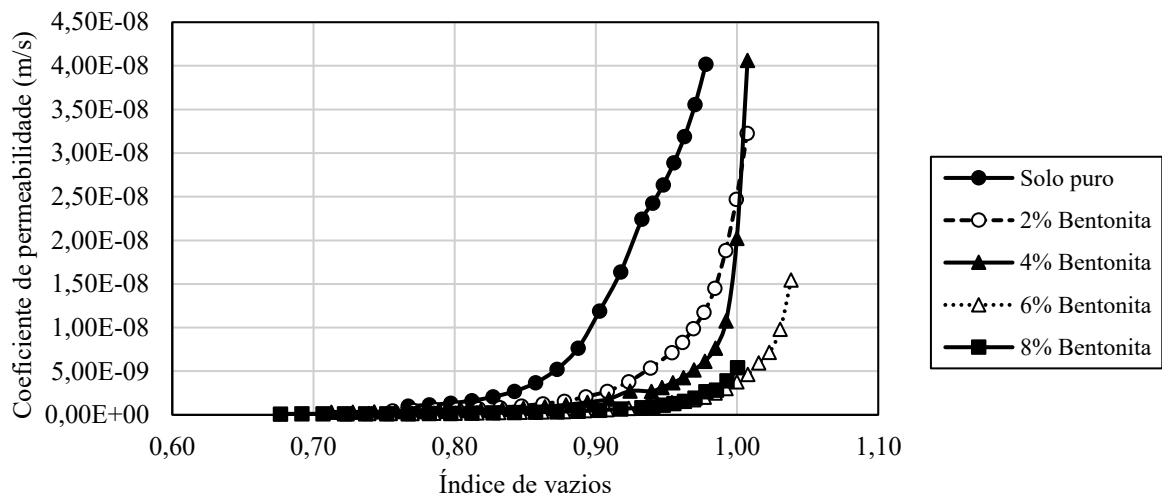
Figura 28: Curvas de variação da relação e/e_0 com a tensão vertical efetiva.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 29 são apresentadas as curvas de variação do coeficiente de permeabilidade a 20°C em função do índice de vazios obtidas nos ensaios CRS realizados com o solo puro e com as misturas com bentonita. As curvas apresentadas na figura, conforme esperado, mostram que com o aumento do teor de bentonita na mistura tem-se redução do seu coeficiente de permeabilidade.

Figura 29: Coeficiente de permeabilidade em função do índice de vazios no ensaio CRS.



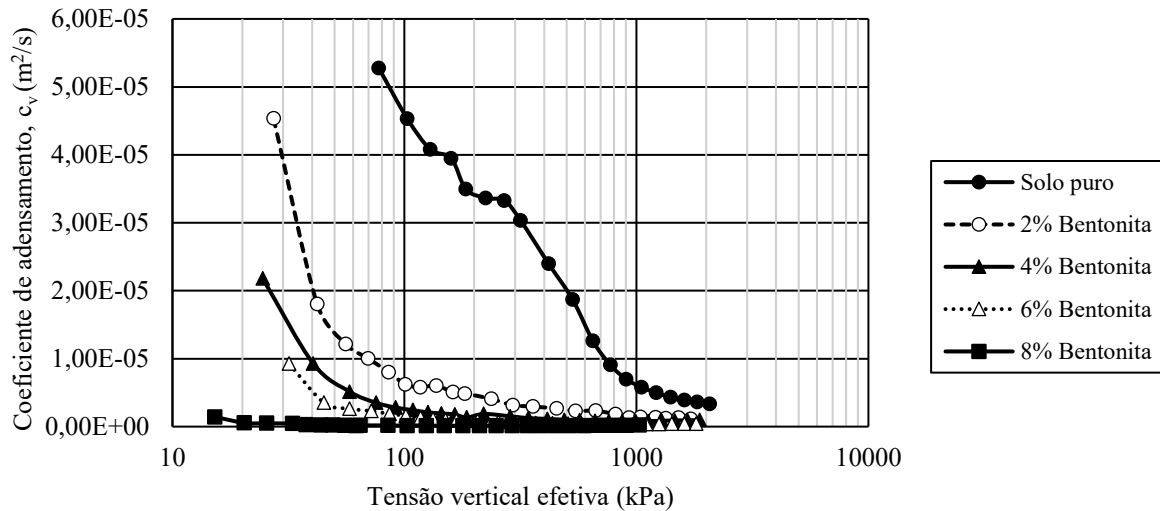
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 30 é apresentada a variação do coeficiente de adensamento (c_v) com a tensão vertical efetiva, na qual se observa que, com o aumento do teor de bentonita, tem-se uma redução do c_v , decorrente principalmente da redução da permeabilidade do solo com o aumento da quantidade de bentonita e da tensão vertical efetiva.

Os resultados apresentados estão de acordo com o que é encontrado na literatura, tendo em vista que dados semelhantes foram obtidos por Morandini e Schneider (2017), os quais também estudaram a compressibilidade de misturas de solo tropical laterítico e bentonita, assim como Sobti e Singh (2017) e Kumar e Yong (2002).

O referido aumento na compressibilidade do solo com a adição de bentonita observado demonstra que tal condição deve ser avaliada na escolha de materiais para camadas impermeabilizantes, uma vez que pode gerar deformações excessivas e o comprometimento da integridade da camada.

Figura 30: Coeficiente de adensamento (c_v) em função da tensão vertical efetiva no ensaio CRS.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Ensaios com o rejeito puro e suas misturas com bentonita

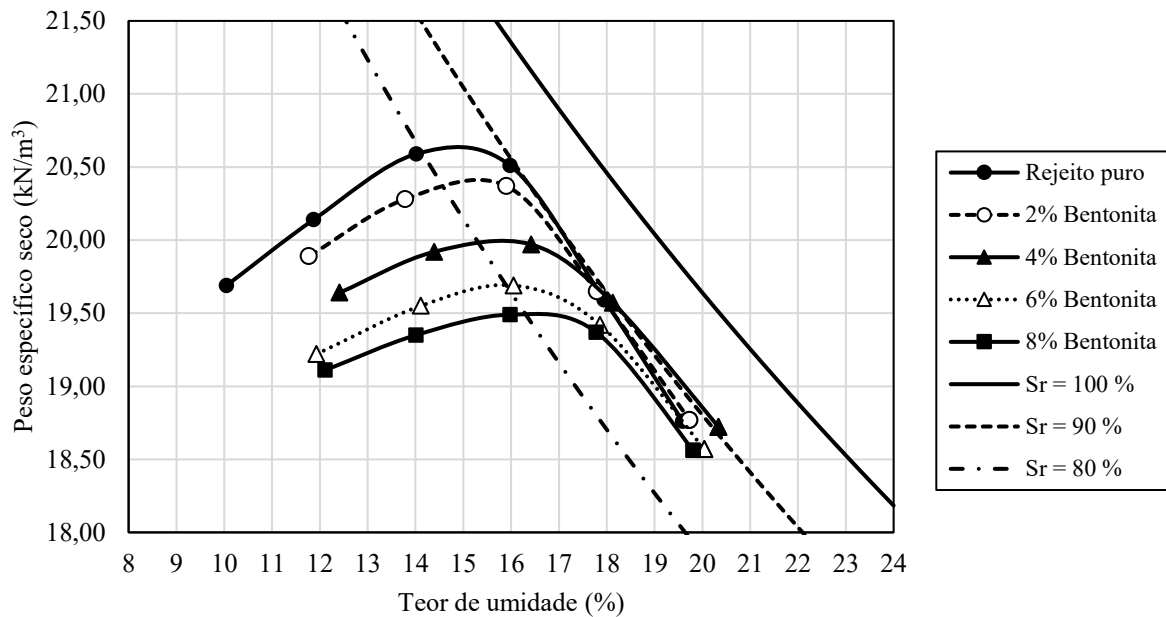
Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o rejeito puro e com suas misturas com bentonita.

4.3.1 Ensaios de compactação (Rejeito-Bentonita)

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de compactação do rejeito e de suas misturas com bentonita, sendo que na Tabela 9 se encontram os respectivos parâmetros de compactação.

Conforme pode ser observado, a adição de bentonita ao rejeito provocou alterações dos parâmetros de compactação, caracterizados pelo teor de umidade ótimo e pelo peso específico seco máximo. Verifica-se que, com o aumento do teor de bentonita, tem-se aumento do teor de umidade ótimo e redução do peso específico seco máximo, repetindo a tendência observada na Figura 16, nas curvas de compactação do solo puro e suas respectivas misturas. Porém, no caso das misturas com o rejeito, observa-se que as alterações ocorreram de forma mais acentuada.

Figura 31: Curvas de compactação do rejeito e das misturas com bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9: Parâmetros de compactação do rejeito e das misturas com bentonita.

Teor de bentonita (%)	Teor de umidade ótimo (%)	Peso específico seco máximo (kN/m³)
0	15,0	20,65
2	15,4	20,41
4	15,8	20,00
6	16,0	19,70
8	16,6	19,50

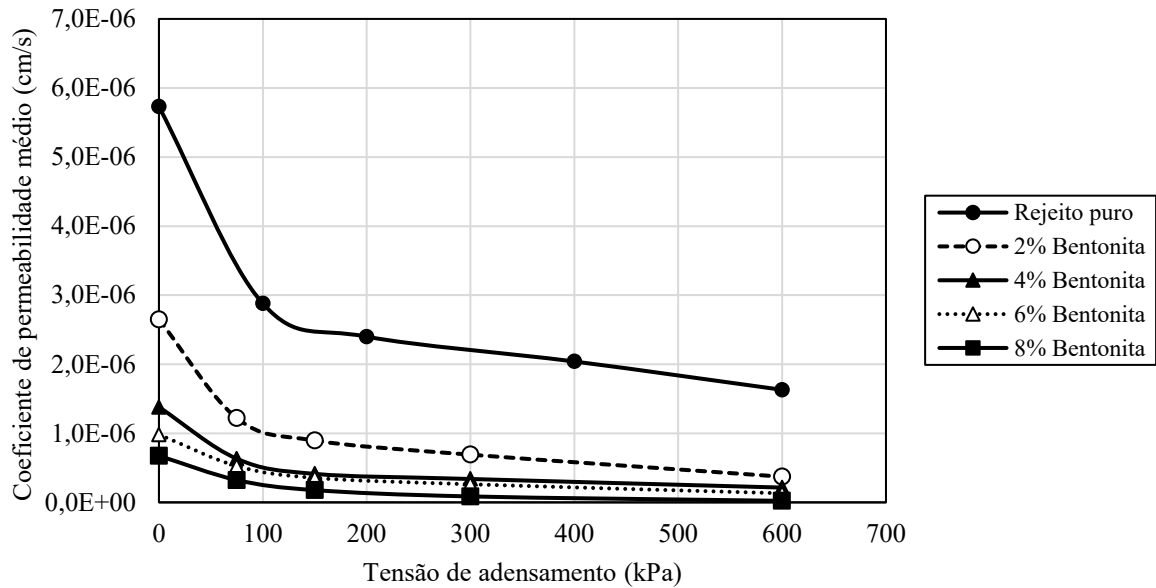
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2 Ensaios de condutividade hidráulica (Rejeito-Bentonita)

Na Figura 32 é apresentada a variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão em que foram adensados os corpos de prova (CPs), sendo que na Tabela 10 se encontram os valores dos respectivos parâmetros.

Pela análise dos resultados apresentados, pode-se observar que o coeficiente de permeabilidade se apresentou menor para os maiores teores de bentonita utilizados nas misturas, conforme esperado, tendo em vista as características da bentonita. No entanto, nos ensaios realizados em CPs não adensados (0 kPa), o maior percentual de bentonita utilizado (8%) não foi suficiente para reduzir o coeficiente de permeabilidade para valores inferiores a 10^{-7} cm/s. Sendo assim, nenhum dos teores de bentonita utilizados nesta pesquisa viabilizaram a utilização do rejeito de mineração em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

Figura 32: Coeficiente de permeabilidade em função do teor de bentonita e do nível de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10: Coeficiente de permeabilidade (cm/s) em função do teor de bentonita e do nível de tensão.

Teor de bentonita (%)	Tensão de adensamento (kPa)				
	0	75	150	300	600
0	5,73E-06	2,88E-06 (1)	2,40E-06 (2)	2,04E-06 (3)	1,63E-06
2	2,65E-06	1,22E-06	8,96E-07	6,91E-07	3,72E-07
4	1,38E-06	6,32E-07	4,13E-07	3,39E-07	2,15E-07
6	9,82E-07	5,26E-07	3,55E-07	2,62E-07	1,32E-07
8	6,74E-07	3,24E-07	1,78E-07	8,61E-08	2,24E-08

Nota: (1) 100 kPa, (2) 200 kPa, (3) 400 kPa.

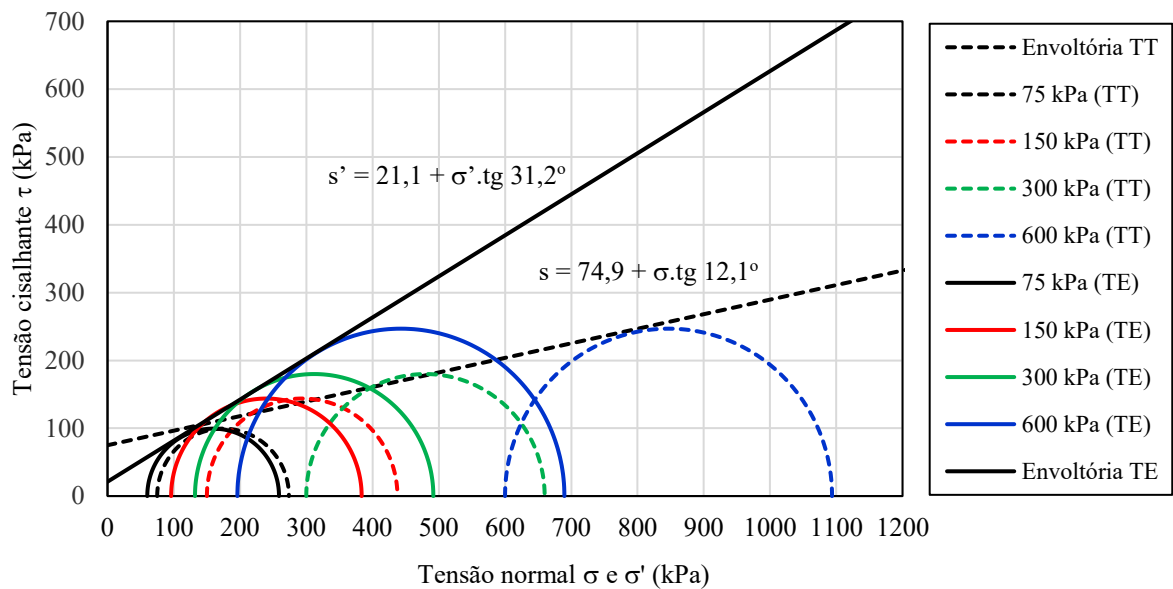
Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Tabela 10, nos ensaios realizados em CPs adensados com 75, 150, 300 e 600 kPa, observou-se reduções na condutividade hidráulica do rejeito puro e de suas misturas com bentonita, da mesma forma ocorrida no solo tropical, o que também pode ser atribuído à redução no índice de vazios com o aumento da tensão de adensamento. No entanto, somente foram obtidos valores de condutividade hidráulica inferiores a 10^{-7} cm/s na mistura com 8% de bentonita adensada a partir de 300 kPa. Portanto, em termos práticos, conclui-se que, com os teores de bentonita utilizados nesta pesquisa, não é possível a aplicação do rejeito para a finalidade desejada, devendo-se, para isso, considerar a aplicação de teores maiores.

4.3.3 Ensaios de resistência ao cisalhamento (Rejeito-Bentonita)

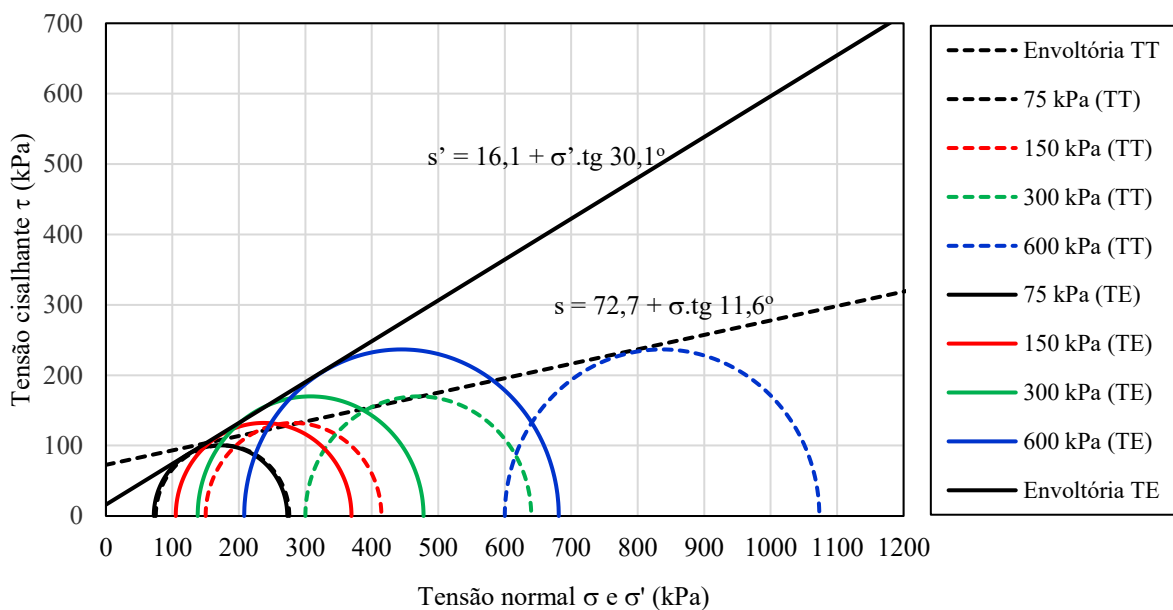
Nas Figuras 33, 34, 35, 36 e 37 são apresentados os círculos de Mohr e as envoltórias de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões totais e de tensões efetivas, do rejeito puro e de suas misturas com bentonita.

Figura 33: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito puro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 2% de bentonita.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 4% de bentonita.

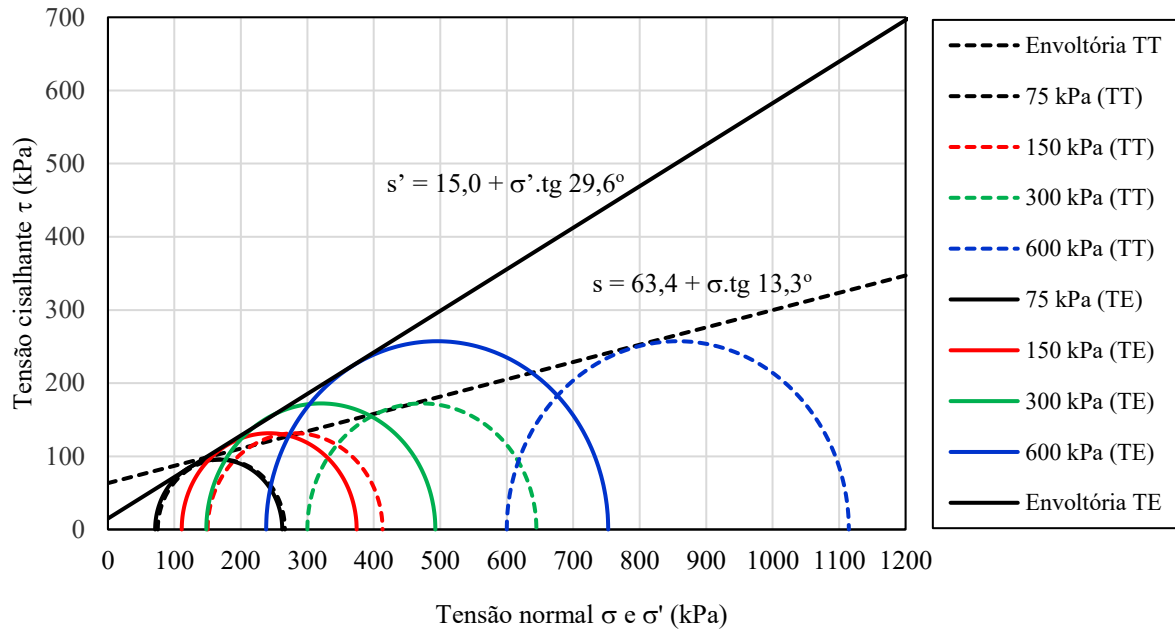


Figura 36: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 6% de bentonita.

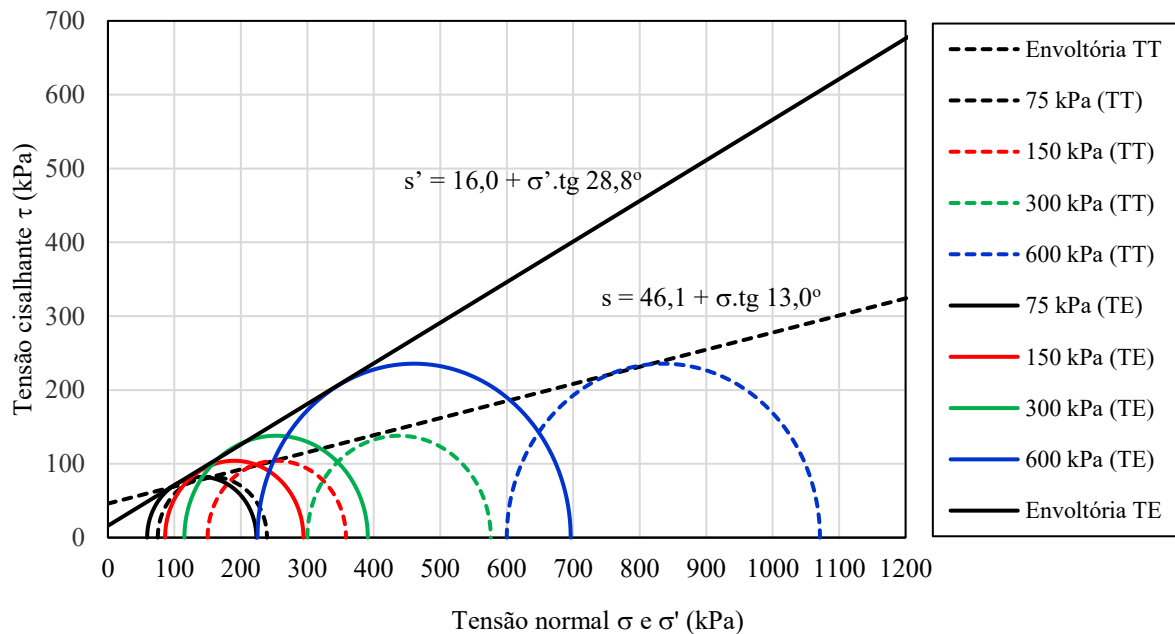
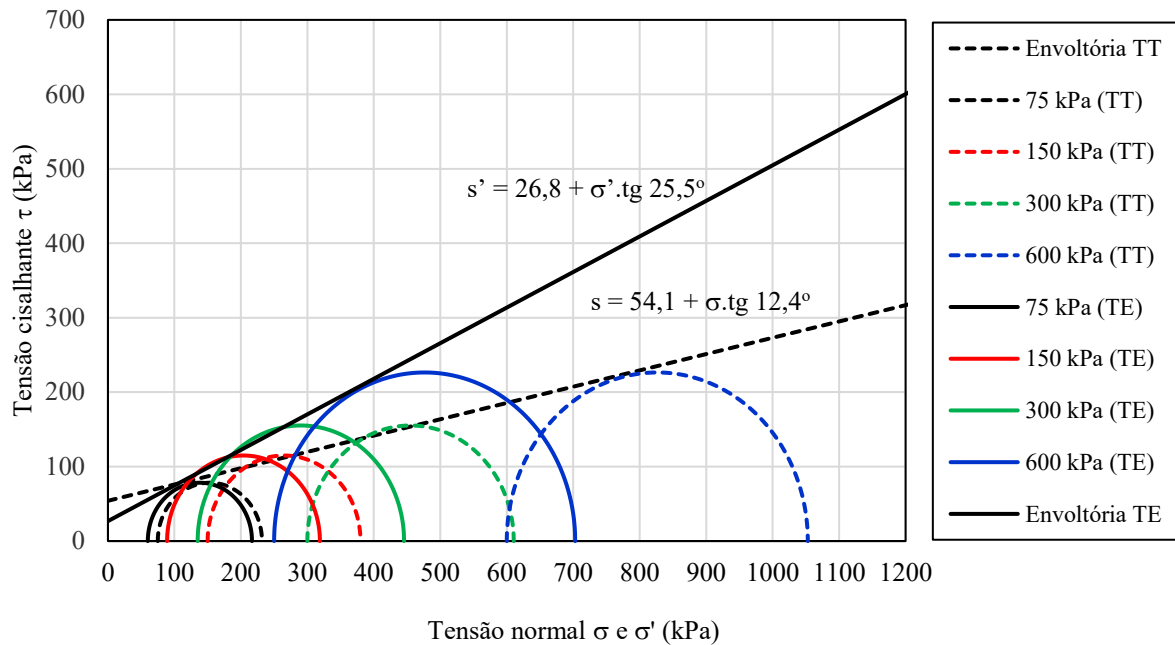


Figura 37: Círculos de Mohr e envoltórias de resistência ao cisalhamento do rejeito com 8% de bentonita.



Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito puro e de suas misturas com bentonita, em termos de tensões efetivas, enquanto na Figura 38 é apresentado um comparativo entre as envoltórias.

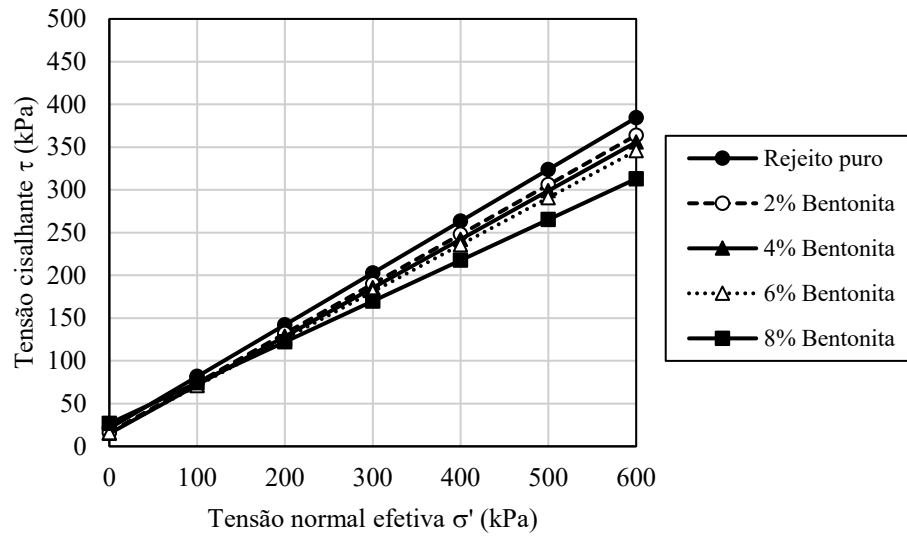
Tabela 11: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do rejeito puro e misturas.

Parâmetro de resistência	Teor de bentonita (%)				
	0	2	4	6	8
Intercepto de coesão (kPa)	22,1	16,1	15,0	16,0	26,8
Ângulo de atrito (graus)	31,2	30,1	29,6	28,8	25,5

Fonte: Elaborado pela autora.

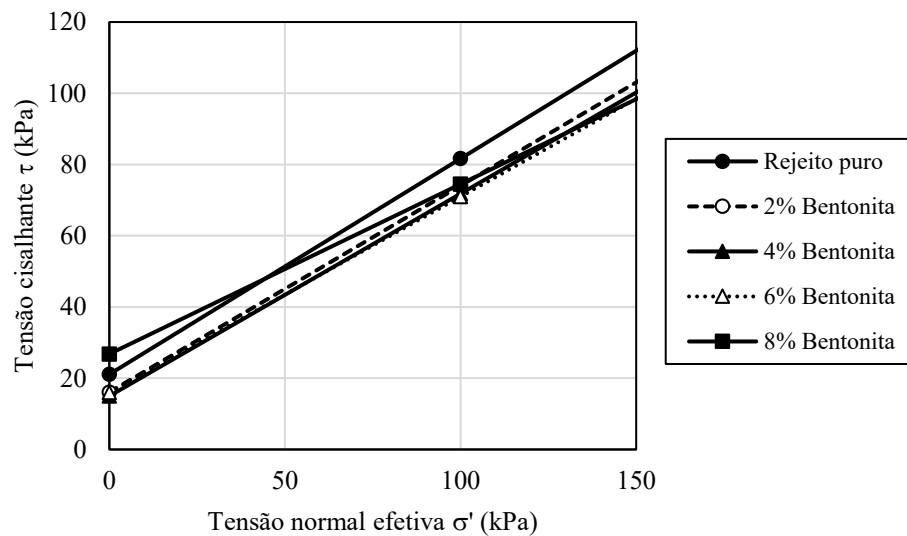
Tal como para o solo, no caso do rejeito, os resultados apresentados também mostram que, no geral, houve uma tendência de redução da resistência ao cisalhamento com a adição de bentonita, proporcionada principalmente pela redução do ângulo de atrito interno efetivo das misturas. Porém, para as misturas de rejeito-bentonita, houve um comportamento diferenciado para baixos níveis de tensões (Figura 39), nas quais a parcela coesiva apresentou tendência de redução com 2% de bentonita, se mantendo praticamente constante até o teor de 6%. No entanto, com 8% de bentonita houve expressivo aumento da parcela coesiva, fato esse que se refletiu somente em aumento da resistência ao cisalhamento para baixos níveis de tensões, uma vez que houve queda do ângulo de atrito interno da mistura.

Figura 38: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas do rejeito puro e misturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39: Detalhe das envoltórias em termos de tensões efetivas para baixos níveis de tensões.



Fonte: Elaborado pela autora.

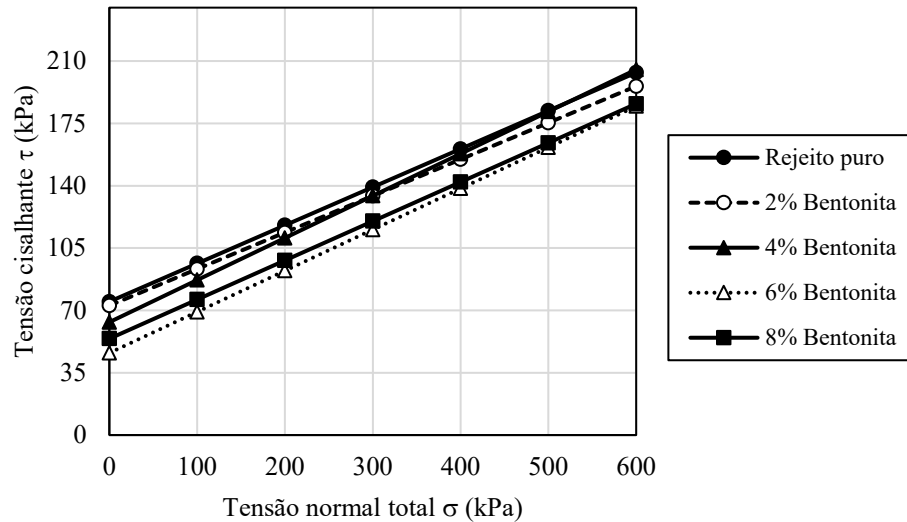
Na Tabela 12 são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do rejeito puro e de suas misturas com bentonita, em termos de tensões totais, enquanto na Figura 40 é apresentado um comparativo entre as envoltórias.

Tabela 12: Parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do rejeito puro e misturas.

Parâmetro de resistência	Teor de bentonita (%)				
	0	2	4	6	8
Intercepto de coesão (kPa)	74,9	72,7	63,4	46,1	54,1
Ângulo de atrito (graus)	12,1	11,6	13,3	13,0	12,4

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40: Envoltórias de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais do rejeito puro e misturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

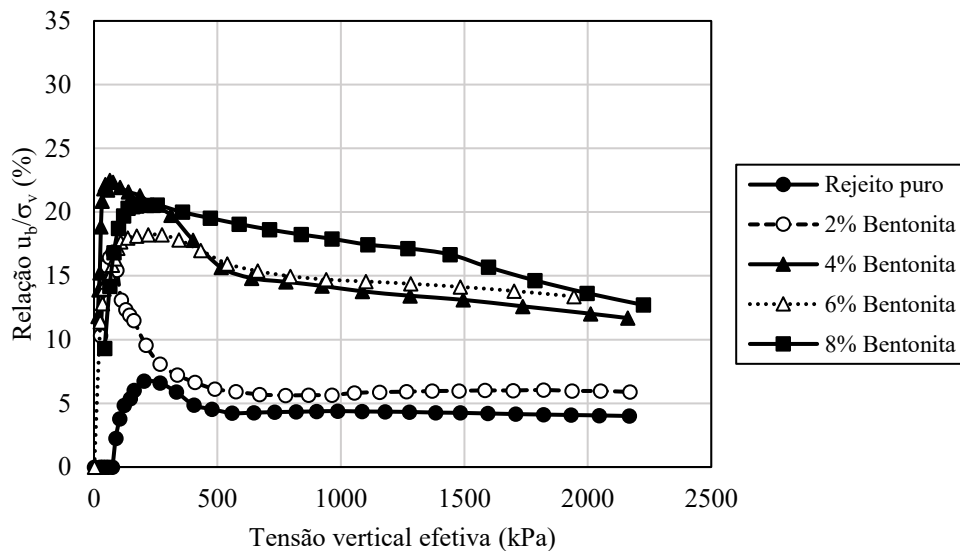
No caso das envoltórias em termos de tensões totais (Figura 40), observa que, no geral, também houve uma tendência de redução da resistência ao cisalhamento com a adição de bentonita, ficando, inclusive, todas as envoltórias das misturas abaixo da correspondente ao rejeito puro, no intervalo de tensões estudado. Quanto à parcela coesiva, observou-se uma tendência de redução desta até o teor de 6% de bentonita, havendo ligeiro aumento para o teor de 8%. O ângulo de atrito apresentou um comportamento de oscilação dos valores com o aumento do teor de bentonita, mas que não foi suficiente para superar a resistência ao cisalhamento do rejeito puro.

Conforme os resultados obtidos para as misturas rejeito-bentonita, verifica-se novamente a importância da análise da resistência ao cisalhamento das misturas de materiais com bentonita que irão compor as camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

4.3.4 Ensaios de adensamento CRS (Rejeito-Bentonita)

Na Figura 41 são apresentadas as variações da razão R_u (u_b/σ_v) em função da tensão vertical atuante nos ensaios CRS realizados com o rejeito puro e suas misturas com bentonita. Tal como no caso dos ensaios com o solo e suas misturas, verificou-se, também nos ensaios com o rejeito, a mesma tendência inicial de aumento da razão R_u , apresentando a seguir uma queda ao se aproximar do trecho normalmente adensado do material. Com exceção da mistura com 8% de bentonita, que ficou ligeiramente acima, todas as demais se situaram no intervalo entre 3% e 15%, conforme recomendado pela norma D4186/D4186M (ASTM, 2012). Esta condição só foi atingida pela mistura com 8% de bentonita na etapa final do ensaio.

Figura 41: Variação da razão R_u (u_b/σ_v) com a tensão vertical efetiva nos ensaios CRS com o rejeito e misturas.



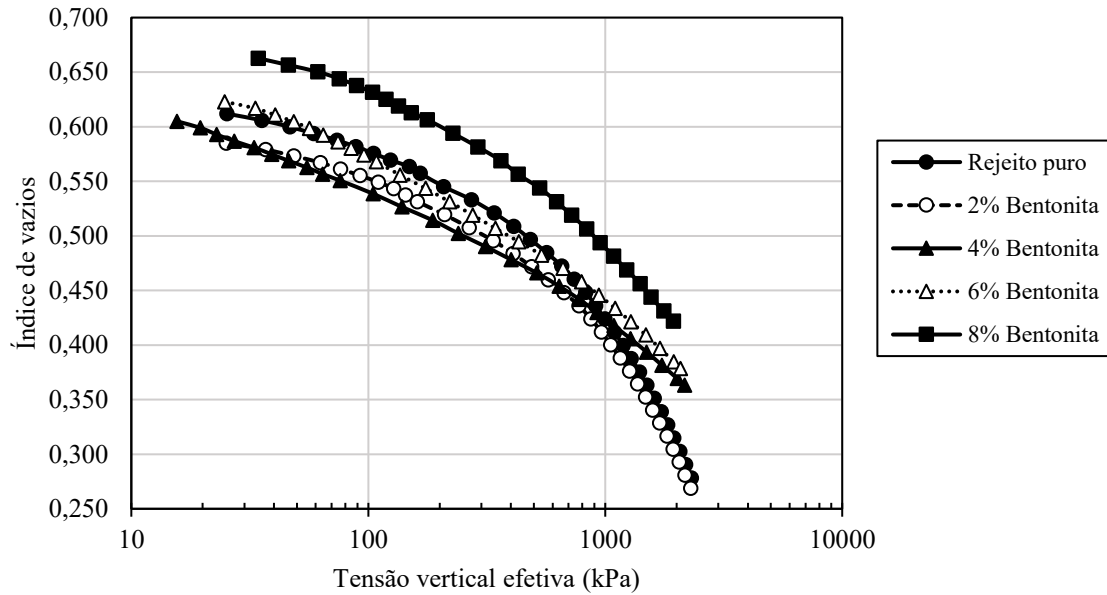
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 42 são apresentadas as curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva obtidas no ensaio CRS e, na Figura 43, se encontram as curvas de tensão vertical efetiva em função da relação e/e_0 , para cada CP ensaiado, onde “e” se refere ao índice de vazios para um determinado valor de tensão, e “ e_0 ” ao índice de vazios inicial do CP.

Conforme pode ser observado nas Figuras 42 e 43, para as misturas com 4% e 6% de bentonita, houve aumento na compressibilidade para tensões até em torno de 1000 kPa, quando comparadas ao rejeito puro. Já para a mistura com 2% bentonita, praticamente não houve alteração da compressibilidade em relação ao rejeito puro, enquanto para a mistura com 8% de bentonita, observou-se até uma ligeira redução na compressibilidade. Portanto, em termos

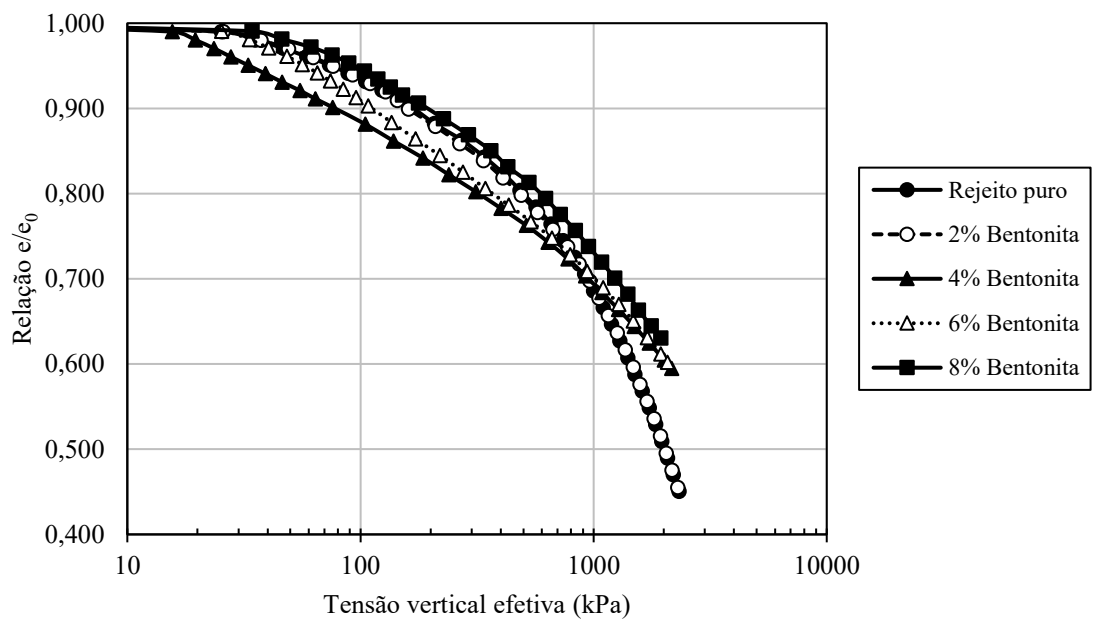
práticos, pode-se dizer que, para os teores estudados, a adição de bentonita ao rejeito afetou a compressibilidade da mistura de forma bem menos intensa que no caso do solo tropical.

Figura 42: Curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva no ensaio CRS.



Fonte: Elaborado pela autora.

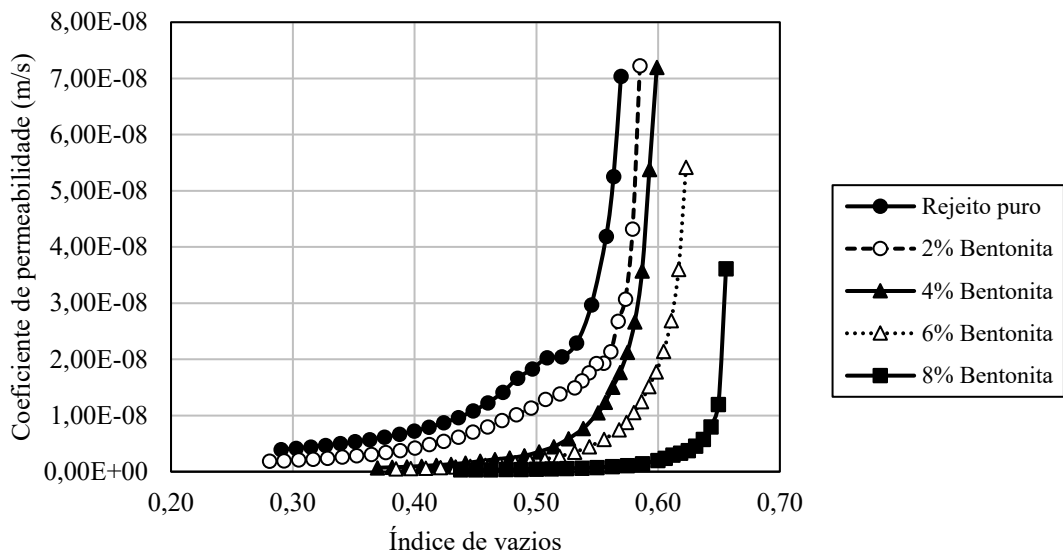
Figura 43: Curvas de variação da relação e/e_0 com a tensão vertical efetiva.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 44 são apresentadas as curvas de variação do coeficiente de permeabilidade a 20°C em função do índice de vazios obtidas nos ensaios CRS realizados com o rejeito puro e suas respectivas misturas com bentonita. Como esperado, as curvas mostram uma redução do coeficiente de permeabilidade do rejeito com o aumento do teor de bentonita, conforme discutido na seção 4.3.2.

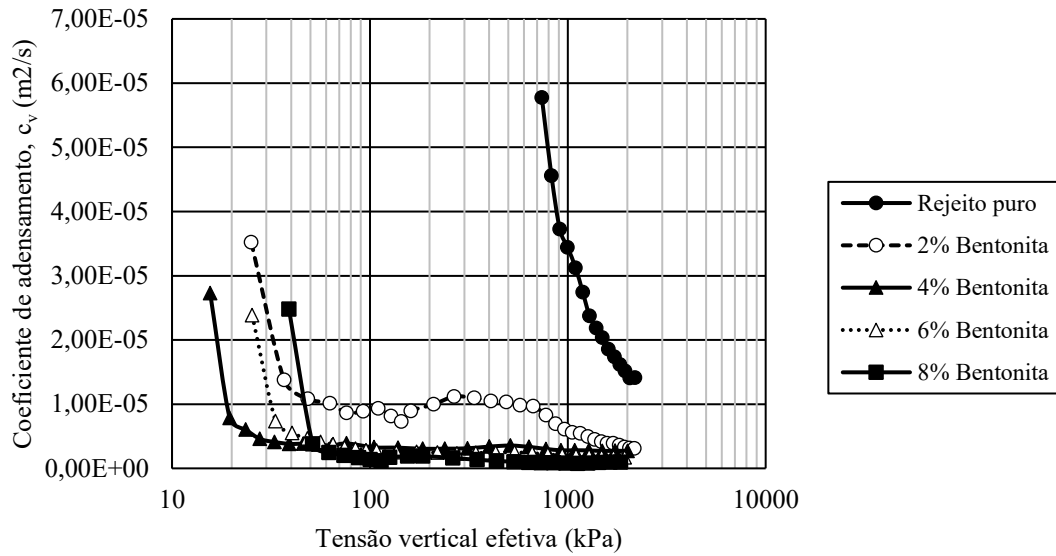
Figura 44: Coeficiente de permeabilidade em função do índice de vazios no ensaio CRS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 45 é apresentada a variação do coeficiente de adensamento (c_v) para as misturas de rejeito e bentonita, nas quais se observa que, de forma geral, houve tendência de redução desse parâmetro com o aumento do teor de bentonita e do nível de tensões. Tal como no caso das misturas de solo-bentonita, este comportamento pode ser atribuído à redução do coeficiente de permeabilidade proporcionado pelo aumento no teor de bentonita e redução do índice de vazios com o acréscimo das tensões efetivas.

Figura 45: Coeficiente de adensamento (c_v) em função da tensão vertical efetiva no ensaio CRS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Porém, de forma distinta da verificada para as misturas de solo-bentonita, em que houve uma tendência de redução dos valores de c_v com o aumento do teor de bentonita para todo o intervalo de tensões estudado, nas misturas de rejeito e bentonita, o comportamento com relação a este parâmetro não apresentou uma tendência bem definida, quando se considera tensões efetivas até em torno de 50 kPa. Chama-se atenção que, nesse intervalo de tensões efetivas, as misturas com 6% e 8% de bentonita ficaram à direita daquelas com menores teores. Quanto a isso, não se pode afirmar que esta seja uma tendência de comportamento dessas misturas, uma vez que somente foram estudados teores de bentonita até 8%.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi proposto analisar o potencial de aplicação de misturas de bentonita com um solo tropical e com um rejeito de mineração, tendo em vista sua aplicação como barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários. As alterações provocadas pela adição da bentonita foram observadas mediante um programa experimental de ensaios de laboratório, de forma a contribuir no avanço das pesquisas que propõem tanto o uso de solos tropicais lateríticos quanto de resíduos nas camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Isto posto, as seguintes conclusões são apontadas:

A partir das curvas de compactação foi possível observar que, tanto para as misturas de solo tropical-bentonita como de rejeito de mineração-bentonita, os parâmetros de compactação, caracterizados pelo teor de umidade ótimo e pelo peso específico seco máximo foram alterados conforme o aumento no teor de bentonita. Observou-se um aumento no teor de umidade ótimo e uma redução do peso específico seco máximo.

A condutividade hidráulica do solo puro (sem aditivo) utilizado neste trabalho foi da ordem de 10^{-6} cm/s, valor este fora do limite imposto para a utilização como camada impermeabilizante (10^{-7} cm/s). Os resultados dos ensaios em corpos de prova (CPs) não adensados indicaram uma diminuição na condutividade hidráulica com o acréscimo de bentonita ao solo, sendo que o teor de bentonita que reduziu a condutividade hidráulica para valores aceitáveis foi o de 8%. Conforme previsto, a condutividade hidráulica diminuiu tanto com o acréscimo de bentonita como com o aumento da tensão de adensamento dos CPs. Considerando estes aspectos, foi possível obter valores inferiores a 10^{-7} cm/s somente com o teor de 4%, em CPs adensados a partir de 300 kPa, e com o teor de 6%, em CPs adensados a partir de 75 kPa.

Com relação ao rejeito puro (sem aditivo), a condutividade hidráulica foi da ordem de 10^{-6} cm/s, estando, dessa forma, fora da margem de utilização em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Os resultados mostraram um decréscimo do coeficiente de permeabilidade com o aumento do teor de bentonita. No entanto, considerando os ensaios em CPs não adensados, nenhum dos percentuais atingiu a redução exigida. Quando se considera a influência da tensão de adensamento, somente foram obtidos valores de condutividade hidráulica inferiores a 10^{-7} cm/s na mistura com 8% de bentonita adensada a partir de 300 kPa. Portanto, em termos práticos, conclui-se que os teores de bentonita utilizados nesta pesquisa não foram suficientes para viabilizar a aplicação do rejeito para o tipo de obra desejado, devendo-se, para isso, considerar a aplicação de teores maiores.

No que se refere à resistência ao cisalhamento, observou-se que, tanto para as misturas solo-bentonita como rejeito-bentonita, a resistência ao cisalhamento apresentou, no geral, uma redução conforme o aumento do teor de bentonita. Tais resultados demonstram a necessidade de se avaliar possíveis perdas de resistência ao cisalhamento decorrentes da adição de bentonita aos mais diferentes materiais com a finalidade de utilização como revestimento de fundo de aterros sanitários.

Com relação à compressibilidade, os resultados dos ensaios de adensamento das misturas solo-bentonita indicaram que há uma relação entre o aumento do teor de bentonita e o aumento da compressibilidade da mistura. Já para as misturas rejeito-bentonita, houve um aumento na compressibilidade para as misturas com 4% e 6% de bentonita, quando comparadas ao rejeito puro. Contudo, para a mistura a 8% de bentonita, observou-se uma ligeira redução na compressibilidade. Portanto, quando comparado com seu efeito nas misturas com o solo tropical, a adição dos mesmos teores de bentonita ao rejeito resultou em um comportamento um pouco diferenciado no que diz respeito à compressibilidade, sem apresentar uma tendência contínua de acréscimo da mesma com maiores teores de bentonita.

Para ambas as misturas de materiais estudados, a variação do coeficiente de permeabilidade durante o ensaio de adensamento mostrou, conforme esperado, uma redução do coeficiente de permeabilidade com o aumento no teor de bentonita.

De uma forma geral, a mistura do solo tropical estudado com 8% de bentonita mostrou-se tecnicamente apta a ser utilizada como barreira impermeabilizante de aterros sanitários, tendo em vista a redução da condutividade hidráulica. Contudo, devem ser ponderados todos os fatores de interação entre a bentonita e o solo tropical laterítico.

Já para a utilização de rejeito de mineração, os teores de bentonita utilizados nessa pesquisa não foram suficientes para viabilizar a sua utilização nas camadas impermeabilizantes de aterros sanitários.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através da revisão bibliográfica desenvolvida observou-se que a questão do comportamento da bentonita quando misturada a outros materiais contempla diversos fatores condicionantes, estando, desta forma, distante de ser concluído.

Tendo em vista a crescente produção de resíduos sólidos e a consequente dificuldade de se encontrar solos locais adequados para a construção de camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, torna-se necessário o desenvolvimento de novas pesquisas avaliando o potencial de misturas de bentonita com solos tropicais e também com os mais diversos tipos de resíduos.

Dentro desse contexto, são sugeridos a seguir alguns temas para a elaboração de novas pesquisas:

- Avaliar o comportamento das misturas quando percoladas por lixiviado proveniente de aterros sanitários. Dessa forma, pode-se analisar a interação química entre as misturas e o fluido e a possível influência do fluido percolante no comportamento do material;
- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos materiais e nas misturas, com o objetivo de comparar as estruturas formadas;
- Realizar ensaios de contração volumétrica nas misturas, sendo este um efeito importante quando se trata de barreiras impermeáveis, a fim de quantificar o aparecimento de trincas e fissuras e avaliar o comportamento quanto à condutividade hidráulica destas camadas;
- Realizar ensaios de permeabilidade e adensamento em misturas de rejeito com teores de bentonita acima dos utilizados nesta pesquisa, de forma a obter o teor ideal para utilização em barreiras impermeabilizantes, bem como resultados mais conclusivos relacionados à compressibilidade das misturas;
- Avaliar as consequências, em termos de comportamento, das alterações na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade em seções de aterros sanitários;
- Aplicar a mesma metodologia utilizada nesta pesquisa para solos tropicais de outras regiões de Minas Gerais e também do Brasil, além disso, sugere-se a realização dos ensaios com outros tipos de resíduos, visando novas alternativas para barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIANSYAH, J. S.; ROSANO, M.; VINK, S.; KEIR, G. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1050–1062, dez. 2015.

AMADI, A. A.; EBEREMU, A. O. Characterization of geotechnical properties of lateritic soil-bentonite mixtures relevant to their use as barrier in engineered waste landfills. **Nigerian Journal of Technology**, v. 32, n. 1, p. 93-100, mar. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2487-17e1**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken: ASTM International, 2017. 10 p.

_____. **ASTM D4186/D4186M**: Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled Strain Loading. Philadelphia: ASTM International, 2012. 18p

_____. **ASTM D4767-11**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. West Conshohocken: ASTM International, 2011. 14 p.

_____. **ASTM D5084-16a**: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken: ASTM International, 2016. 24 p.

ANIEKAN, E. I.; EBUNILO, P. O.; OKOVIDO, J. Geotechnical Evaluation of Bentonite Clay for Municipal Solid Waste Landfill Lining Membrane. **Appl. J. Eng. Sci.**, v. 4, n. 3, p. 337-351, mai. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a. 8p.

_____. **NBR 7181**: Análise granulométrica dos solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 12 p.

_____. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c. 5 p.

_____. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 3 p.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016e. 10 p.

_____. **NBR 7182**: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016f. 9 p.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

BARATI, S.; SHOURIJEH, P. T.; SAMANI, N. ASADI, S. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on Golgohar mine. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 79, p. 4151-4166, mai. 2020.

BENATTI, J. C. B.; MIGUEL, M. G. A proposal of structural models for colluvial and lateritic soil profile from southwestern Brazil on the basis of their collapsible behavior. **Engineering Geology**, v. 153, p. 1-11, fev. 2013.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 248 p.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6766, de 19 de dezembro de 1979, 8666, de 21 de junho de 1993, e 8987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 21 ago. 2020.

_____. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 21 ago. 2020.

BUDIHardjo, M. A.; MUHAMMAD, F. I.; RIZALDIANTO, A. R.; SUTRISNO, E.; WARHANA, I. W. Stability Performance of the Mixture of Bentonite and Zeolite as Landfill Liner. **E3S Web of Conferences**, v. 125, p. 1-4, out. 2019.

CAMARGO, K. R. **Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de misturas solo-bentonita: estudo de caso de um aterro sanitário localizado em Rio Grande (RS)**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CAMARGO, K. R.; SILVA, C. F.; BASTOS, C. A. B. Condutividade hidráulica e outras propriedades geotécnicas de mistura areia-bentonita visando aplicação como barreira mineral. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 19, p. 1-11, mai. 2012.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Relations of Clay Fraction Mineralogy, Structure and Water Retention in Oxidic Latosols (Oxisols) from the Brazilian Cerrado Biome. In: VALASKOVA, M. **Clay Minerals in Nature**. Rijeka: InTech, 2012. Capítulo 8, p. 149-170.

CARVALHO, J. C.; CRISPEL, J. J.; MIEUSSENS, C.; NARDONE, A. **La Rescontitution des éprouvettes em laboratorio: Théorie et pratique opératoire**. Rapport de recherche LPC, 145. Paris: Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, 1987.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, v. 1, 2015.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; REGIS, R. D. D.; MEIRELLIS, T. L. Sustentabilidade socioambiental da mineração. **BNDS Setorial**, n. 47, p. 333-390, 2018.

CHEN, J.; BENSON, C. H.; LIKOS, W. J.; EDIL, T. B. Interface Shear Strength of a Bentonite-Polymer Geosynthetic Clay Liner and a Textured Geomembrane. **Geotechnical Frontiers**, v. 276, p. 219-226 jul. 2017.

CHERIYAN, C.; CHANDRAKARAN, S. Suitability of Iron Oxide-Rich Industrial Waste Material in Clay Soil as a Landfill Liner. **Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns**, v. 88, p. 215-228, set. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro Sanitário – Definições**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 23 set. 2020.

CORREIA, N. S.; CALDAS, R. C. S.; OLUREMI, J. R. Feasibility of using CWD fine fraction and bentonite mixtures as alternative landfill barrier material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1877-1886, jul. 2020.

DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Londres: Chapman & Hall, 1993. 683 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro. 1994a.

_____. **ME 256/94: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão**. Rio de Janeiro. 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: DNPM, 2018.

DEVARANGADI, M.; SHANKAR, M. Correlation studies on geotechnical properties of various industrial byproducts generated from thermal power plants, iron and steel industries as liners in a landfill – a detailed review. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, n. 121207 p. 1-25, jul. 2020.

DIAS NETO, S. L. S. **Influência do método de reconstituição de corpos de prova na estrutura e nas propriedades hidráulicas e mecânicas de um solo tropical laterítico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P. Aproveitamento de resíduos sólidos – Estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL*, 5, 2017, Criciúma, **Anais...** Criciúma: SATC, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2017. 574 p.

ESPÓSITO, T. D. J.; DUARTE, A. P. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 393–398, 2010.

EYO, E., ABBEY, S., OTI, J., NG'AMBI, S.; GANJIAN, E., COAKLEY, E. Microstructure and Physical-Mechanical Characteristics of Treated Kaolin-Bentonite Mixture for Application in Compacted Liner Systems. **Sustainability**, v. 13, n. 1657, p. 1-18, fev. 2021.

FREMPONG, E. M.; YANFUL, E. K. Interactions between three tropical soils and municipal solid waste landfill leachate. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 134, n. 3, p. 379-396, mar. 2008.

GONDIM, T. F. **Aplicação geotécnica de resíduo de mineração em sistemas de cobertura final de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

GUIMARÃES, R. M.; BENATTI, J. C. B.; FERREIRA, R. T. L. Análise físico-química e mineralógica de um solo de Sinop-MT, puro e com adição de bentonita. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 21974-21987, abr. 2020.

GUPT, C. B.; BORDOLOI, S.; SAHOO, R. K.; SEKHARAN, S. Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, n. 126033, p. 1-14, jan. 2021.

GUPT, C. B.; BORDOLOI, S.; SEKHARAN, S.; SARMAH, A. K. Adsorption characteristics of Barmer bentonite for hazardous waste containment application. **Journal of Hazardous Materials**, v. 396, n. 122594, p. 1-17, set. 2020.

HEIDER, M. Reaproveitamento de resíduos de minério de ferro. **In the mine**, v. 80, p. 38-41, set/out. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2 ed. São Pulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Rejeitos de mineração**. Disponível em: http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043. Acesso em: 22 mai. 2021.

KASIM, N. A.; AZMI, N. A. C.; MUKRI, M. NOOR, S. N. A. M. Effect on physical properties of laterite soil with difference percentage of sodium bentonite. **AIP Conference Proceedings**, v. 1875, n. 1, p. 1-6, ago. 2017.

KAVYA, M. P.; ANJANA, T. R. Effect of bentonite on hydraulic conductivity of compacted soil liners. **International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology**, v. 3, n. 23, p. 74-77, abr. 2016.

KAYA, A.; DURUKAN, S. Utilization of Bentonite-embedded zeolite as clay liner. **Applied Clay Science**, v. 25, n. 2, p. 83-91, abr. 2004.

KHALID, N.; MAZIDAH, M.; KAMARUDIM, F. GHANI, A. H. A. Effect of compaction characteristics on hydraulic conductivity performance for sedimentary residual soil mixed bentonite as compacted liners. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 498, p. 1-8, jun. 2020.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 796 p.

KUMAR, S.; YONG, W. L. Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 11, n. 1, p. 71-89, 2002.

LANGE, L. C.; CATANHADE, A. L. G.; TEIXEIRA, E. N.; SIMÕES, G. F.; LIMA, W. S.; CATAPRETA, C. A. A.; FREITAS, I. C. **Resíduos Sólidos: Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. Belo Horizonte: ReCESA, 2008. 120 p.

LEME, M. A. G. **Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

LEMONS, R. G.; LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; CONSOLI, N. C.; HEINECK, K. S. O uso da bentonita sódica na Geotecnia Ambiental – Contenção de NaOH. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENG. GEOTÉCNICA, 14, 2008, Búzios. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2008.

LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **REGET/UFSM**, v. 20, n. 1, p. 200-210, jan/abr. 2016.

LOPERA, J. F. B. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LUKIANCHUKI, J. A.; ESQUIVEL, E. R. Hydraulic Conductivity and Shear Strength Behavior of Compacted Lateritic Soil-Bentonite Mixtures Used for Sanitary Landfill Liners. **Soils and Rocks**, v. 33, n. 2, p. 69-79, mai./ago. 2010.

MACAMBIRA, I. Q. **Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MARITSA, L. TSAKIRIDIS, P. E.; KATSIOTIS, N. S.; TSIAVOS, H., VELISSARIOU, D., XENIDIS, A.; BEAZI-KATSIOTI, M. Utilization of spilitic mining wastes in the construction of landfill bottom liners. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, p. 1818-1825, mar. 2016.

MARTINS, L. A. **Influência da adição de bentonita em misturas alternativas para a utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

MENDES, B. C. **Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D.; CAMPANELLA, R. Permeability of Compacted Clay. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 91, n. 4, p. 41-65, 1965.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 592 p.

MORANDINI, T. L. C. M.; LEITE, A. L. Misturas de solo laterítico e bentonita como barreiras alternativas para aterros sanitários no Brasil. **Geotecnia**, n. 134, p. 43-59, jul. 2015.

MORANDINI, T. L. C.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. **Holos Environment**, v. 17, n. 1, p. 66-78, jul. 2017.

NAMBIAR, N. REMYA, N. VARGHESE, G. K. Effective reuse of waste material as an amendment in composite landfill liner: Assessment of geotechnical properties and pollutant retention capacity. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 2, p. 134-141, nov. 2019.

OLAOYE, R. A.; AFOLAYAN, O. D.; OLADEJI, V. O.; SANI, R. O. Influence of bentonite on clayey soil as a landfill baseliner materials. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 640, p. 1-9, nov. 2019.

OPAFOLA, O. T.; ADEKUNLE, A. A.; BADEJO, A. A.; ADEOSUN, O. J. Potentials of bentonite enhanced termite mound soil for bottom lining in waste containment system. **Journal of Degraded and Mining Lands Management**, v. 7, n. 33, p. 2185-2191, abr. 2020.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POTTER, H. A. B.; YONG, R. N. Waste Disposal by Landfill in Britain: Problems, Solutions and the Way Forward. *In*: GREEN' 93 – INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICS RELATED TO THE ENVIRONMENT, 1993, Bolton, Reino Unido. **Anais...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1995, p. 167-173.

PRONGMANEE, N.; NOULMANEE, A.; PUKDEE, W.; CHANTARASENA, K. Permeability Investigation of Compacted Bentonite-Treated Lateritic Soil Liner Using a Consolidation Test. **Maharakham International Journal of Engineering Technology**, v. 7, n. 1, p. 1-5, jan. 2021.

QUEIROZ, A. C. G. **Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados**. 2015. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RAMADAM, B. S.; ALFANTI, L.K.; SUTRISNO, E.; BUDIHardjo, M. A. WARDHANA, I. W.; YUMAROH, S. Metal industry waste desiccation behavior with addition of bentonite as a landfill liner. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 623, p. 1-6, 2021.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 5 ed. Lavras: UFLA, 2007, 322 p.

RESTREPO, D. A. G. **Análise do processo de ressecamento em misturas de resíduos de construção civil (RCC) e bentonita para aplicação em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RIBEIRO, P. M. **Comportamento mecânico de uma bentonita reforçada com borracha de pneu e PET triturado**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ROUT, S.; SINGH, S. P. Characterization of pond ash-bentonite mixes as landfill liner material. **Waste Management & Research**, v. 20, n. 10, p. 1-9, mar. 2020.

ROWE, R. K. Barrier systems. *In*: ROWE, R. K. **Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook**. Norwell: Kluwer Academic Publishing, 2001. Capítulo 25, p. 739-788.

RUBINOS, D. A.; SPAGNOLI, G. J. Utilization of waste products as alternative landfill liner and cover materials – a critical review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 4, p. 376-438, mai. 2018.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 1989. 408 p.

SILVA, C. F. **Estudo do comportamento hidráulico de mistura solo-bentonita visando alternativa de emprego como sistema de proteção para aterros sanitários**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVA, L. C. S.; MARINHO, D. Y.; SILVA FILHO C. M.; SILVA, E. C. S.; ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeito na mineração. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 9, 2017, Aracaju, **Anais...** Aracaju: SIMPROD, 2017.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOBTI, J.; SINGH, S. K. Hydraulic conductivity and compressibility characteristics of bentonite enriched soils as a barrier material for landfills. **Innov. Infrastruct. Solut.**, v. 2, n. 12, p. 1-13, abr. 2017.

STEUDEL, A. MEHL, D. EMMERICH, K. Simultaneous thermal analysis of different bentonite-sodium carbonate systems: an attempt to distinguish alkali-activated bentonites from raw materials. **Clay Minerals**, v. 48, n. 1, p. 117-128, mar. 2013.

THANKAM, N. S.; REKHA, V.; SHANKAR, U. Use of lateritic soil amended with bentonite as landfill liner. **Rasayan J. Chem.**, v. 10, n. 4, p. 1431-1438, dec. 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure**. Cincinnati: EPA/825/4-89/022, 1989. 140 p.

VANDERCASTEELE, C.; VAN DER SLOOT, H. A. Sustainable management of waste and recycled materials in construction. **Waste Manage.**, v. 31, n. 2, p. 199-200, fev. 2011.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; NETO, A. Z. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. São Paulo: Arte e ciência editora, 2009.

WASIL, M. Effect of Bentonite Addition on the Properties of Fly Ash as a Material for Landfill Sealing Layers. **Applied Sciences**, v. 10, n. 4, p. 1-13, fev. 2020.

WIDOMSKI, M. K.; STEPNIIEWSKI, W.; MUSZ-POMORSKA, A. Clays of Different Plasticity as Materials for Landfill Liners in Rural Systems of Sustainable Waste Management. **Sustainability**, v. 10, p. 1-16, jul. 2018.

YUSUF, U. S.; SLIM, M. D.; UCHECHUKWU, E. A. Hydraulic Conductivity of Compacted Laterite Treated with Iron Ore Tailings. **Advances in Civil Engineering**, v. 2016, p. 1-9, mai. 2016.