



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

---

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUO DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA MELHORADO COM CIMENTO  
PORTLAND**

**GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA**

GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUO DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA MELHORADO COM CIMENTO  
PORTLAND**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador(a): Prof. Dra. Carina Silvani

V293c

Varela, Gilson Gabriel Teixeira.

Comportamento geomecânico de resíduo de mineração de bauxita melhorado com cimento Portland / Gilson Gabriel Teixeira Varela – Campina Grande, 2024.

161 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Profa. Dra. Carina Silvani."

Referências.

1. Geotecnia. 2. Rejeito de Mineração. 3. Estabilização de Solos. 4. Encapsulamento de Metais. 5. Índice Porosidade/Teor Volumétrico de Cimento. 6. Ensaio Triaxiais. I. Silvani, Carina. II. Título.

CDU 624.13(043)

**GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA**

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUO DE  
MINERAÇÃO DE BAUXITA MELHORADO COM CIMENTO  
PORTLAND**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 28 / 02 / 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani

Universidade Federal de Campina Grande

Presidente/Orientadora

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Universidade Federal de Campina Grande

Examinadora Interna

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Helena Paula Nierwinski

Universidade Federal de Santa Catarina

Examinador Externo



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.ª ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA - PPGECA/UFCG - EXAMINADORA INTERNA, DR.ª HELENA PAULA NIERWINSKI - PPGECA-UFSC - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 07/2024). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE RESÍDUO DE BAUXITA MELHORADO COM CIMENTO PORTLAND" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 28 DE FEVEREIRO 2024**

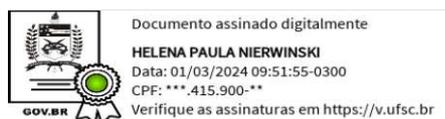
5.

6.

7.

8.

9. **HELENA PAULA NIERWINSKI - EXAMINADORA EXTERNA**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/02/2024, às 08:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilson Gabriel Teixeira Varela, Usuário Externo**, em 29/02/2024, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 29/02/2024, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 01/03/2024, às 09:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4171890** e o código CRC **D94E3C9E**.

---

## AGRADECIMENTOS

À medida que concluo este significativo capítulo da minha jornada acadêmica, expresso profunda gratidão a todos que contribuíram para o sucesso desta dissertação de mestrado.

Primeiramente, agradeço a Deus, a quem recorri muitas vezes em busca de força, coragem, calma e sabedoria para permanecer firme diante dos desafios enfrentados ao longo desses dois anos de mestrado.

À minha família, sempre presente em todos os momentos da minha vida. Especialmente à minha mãe, Maria de Lourdes Dias Teixeira Varela, que sempre lutou pelo melhor para seus filhos, incentivando-me a perseguir meus sonhos e lembrando-me constantemente de que com fé em Deus e dedicação é possível superar qualquer desafio. À minha esposa, Gessyelle Catarine da Silva, que sempre me apoiou, irradiando energias positivas e depositando confiança. Aos meus irmãos, Natalice Margareth Teixeira Varela e Wilson Rafael Teixeira Varela, a quem busquei apoio, compreensão, carinho e auxílio.

Estendo minha gratidão aos dedicados professores do PPGECA que fizeram parte do meu percurso acadêmico, assim como aos funcionários do LEP, que sempre dispuseram a ajudar. Agradeço especialmente à minha orientadora, professora Dra. Carina Silvani, cujo conhecimento e orientação foram inestimáveis. Graças à sua atenção e disponibilidade, foi possível concluir a dissertação nesse período de dois anos, apesar dos contratemplos. E ao professor John Kennedy, que sempre se preocupou e prontificou em ajudar diante dos percalços que surgiam.

À ALUMAR, pelo generoso patrocínio e apoio ao longo deste percurso. A confiança e investimento da empresa foram fundamentais para a realização deste projeto, enriquecendo-o com perspectivas práticas e aplicáveis.

Agradeço ao David Fernandes e à Aldenora Neta pela orientação e apoio contínuo. Suas valiosas contribuições não apenas elevaram a qualidade da pesquisa, mas também moldaram minha compreensão das aplicações do conhecimento no ambiente profissional.

Ao Daniel e Manuel, expresso minha sincera gratidão pelo auxílio essencial nos primeiros ensaios mecânicos. Aos colegas pesquisadores, agradeço a valiosa parceria e companheirismo estabelecidos ao longo desta jornada.

Agradeço aos amigos, que estiveram presentes nos momentos felizes e marcantes, contribuindo para tornar o percurso de mestrado mais leve, meu especial agradecimento.

Por fim, dedico este trabalho àqueles que acreditaram em mim desde o início e agradeço a todos por fazerem parte desta jornada e por tornarem este momento possível.

## RESUMO

O setor extrativo minerador desempenha um papel crucial na sociedade, fornecendo insumos essenciais para a vida cotidiana. Nas últimas duas décadas, a produção de óxido de alumina experimentou um rápido crescimento em todo o mundo, impulsionado pela industrialização e urbanização global. Esse crescimento acelerado resulta na geração de resíduo de bauxita durante os processos de extração e refino. Devido à toxicidade da sua composição química e ao amplo volume gerado, esse material apresenta desafios geoambientais significativos. Avanços nas tecnologias de desidratação possibilitaram o armazenamento de resíduos de mineração em pilhas secas, considerado uma alternativa mais sustentável para reduzir o risco de contaminação do solo e da água. A técnica de melhoramento de resíduos de mineração com material cimentante, como o cimento Portland, emerge como uma estratégia para potencializar esse método, permitindo o desenvolvimento de pilhas mais altas e seguras, reduzindo o impacto ambiental das operações mineradoras. Contudo, devido à variabilidade nas propriedades físicas, químicas e mecânicas do resíduo, dependendo do minério e do processo industrial aplicado, estudos geotécnicos prévios tornam-se essenciais para garantir estabilidade e segurança. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do resíduo de mineração de bauxita melhorado com cimento Portland. Os resultados demonstram que mesmo baixas concentrações de agente cimentante, como 2% de cimento Portland, são suficientes para proporcionar melhorias significativas no comportamento mecânico e ambiental do resíduo de bauxita. Esse teor resultou em um aumento médio de 33,6% na resistência ao cisalhamento, um ganho de 94,12 kPa no intercepto coesivo efetivo e no encapsulamento de metais como cromo e ferro. Além disso, o índice porosidade/teor volumétrico de cimento demonstrou ser um parâmetro adequado para avaliar as melhorias nas propriedades mecânicas do resíduo, evidenciando que a redução da porosidade e o aumento do teor de cimento contribuem para a melhoria do comportamento geomecânico do material.

**Palavras-chave:** Rejeito de mineração; Estabilização de solos; Encapsulamento de metais; Índice porosidade/teor volumétrico de cimento; Ensaios triaxiais.

## ABSTRACT

The mining extraction sector plays a crucial role in society, providing essential inputs for daily life. Over the last two decades, alumina oxide production has experienced rapid global growth, driven by industrialization and urbanization worldwide. This accelerated growth results in the generation of bauxite residue during extraction and refining processes. Due to the toxicity of its chemical composition and the large volume generated, this material presents significant geo-environmental challenges. Advancements in mining residue dehydration technologies have enabled the storage of residues in dry stacks, considered a more sustainable alternative to reduce the risk of soil and water contamination. The technique of enhancing mining residues with cementitious material, such as Portland cement, emerges as a strategy to leverage this method, allowing for the development of taller and safer stacks, thereby reducing the environmental impact of mining operations. However, due to the variability in the physical, chemical, and mechanical properties of the bauxite residue, depending on the ore and industrial process applied, preliminary geotechnical studies become essential to ensure stability and safety. Hence, this study aims to evaluate the behavior of bauxite mining residue improved with Portland cement. The results demonstrate that even low concentrations of binder, such as 2% Portland cement, are sufficient to provide significant improvements in the mechanical and environmental behavior of bauxite residue. This concentration resulted in an average increase of 33,6% in shear strength, a gain of 94,12 kPa in effective cohesive intercept, and the encapsulation of metals such as chromium and iron. Additionally, the porosity/volumetric cement content index proved to be a suitable parameter to assess improvements in the mechanical properties of the residue, highlighting that the reduction of porosity and the increase in cement content contribute to the improvement of the material's geomechanical behavior.

**Key-words:** Mining tailings; Soil stabilization; Metal encapsulation; Porosity index/volumetric cement content; Triaxial tests.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Processo de produção de alumínio e geração de resíduo de bauxita .....	28
Figura 2. 2: Processo de Bayer .....	30
Figura 2. 3: Curvas granulométricas para diferentes resíduos de bauxita .....	34
Figura 2. 4: Métodos de descarga periférica. (a) Espigão. (b) Descarga pontual.....	36
Figura 2. 5: Separação hidráulica em zonas. ....	37
Figura 2. 6: MEV de amostra de resíduo de bauxita. ....	39
Figura 2. 7: Alteamento por montante.....	43
Figura 2. 8: Alteamento por jusante .....	45
Figura 2. 9: Alteamento pela linha de centro.....	45
Figura 2. 10: Empilhamento drenado .....	46
Figura 2. 11: Faixa de compactação do dry stacking .....	48
Figura 2. 12: Sistema completo de Dry Stack Tailings .....	48
Figura 2. 13: Geometria das pilhas: (a) em vale; (b) em encosta; (c) em formato de pirâmide	49
Figura 2. 14: Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (a) e tração (b) de solo arenoso. ....	54
Figura 2. 15: Zonas de desenvolvimento de resistência em função do teor de cimento .....	54
Figura 2. 16: Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (a) e tração (b) do resíduo de ferro.....	55
Figura 2. 17: Efeito da porosidade na resistência à compressão simples do resíduo de ferro com 11% de umidade. ....	57
Figura 2. 18: Microestrutura de solo (a) sem cimentação e (b) com cimentação.....	58
Figura 2. 19: Curva do fator vazios/cimento versus resistência à Curva do fator vazios/cimento versus resistência à compressão simples .....	60
Figura 2. 20: Deformação axial versus tensão desvio e deformação axial versus poropressão para diferentes teores de cimento, $\sigma_3 = 60 \text{ kN/m}^2$ .....	62
Figura 2. 21: Deformação axial versus tensão desvio e deformação axial versus poropressão de resíduo de ferro com e sem cimentação para diferentes tensões de confinamento.....	63
Figura 2. 22: Modelo de comportamento de um material com predominância da cimentação	64
Figura 2. 23: Modelo de comportamento de um material com predominância da cimentação Alteração na resistência à compressão triaxial devido a adição de 4% de cimento em um cascalho .....	65
Figura 2. 24: Dedução do método proposto a partir do círculo de Mohr-Coulomb .....	66

Figura 3. 1: Amostra do Resíduo de Bauxita.....	68
Figura 3. 2: Area de Resíduo de Bauxita 6.....	69
Figura 3. 3: Amostragem do material na ARB 6.....	69
Figura 3. 4: Recepção das amostras.....	70
Figura 3. 5: Amostra do cimento Portland CP V - ARI .....	70
Figura 3. 6: Fluxograma de pesquisa.....	72
Figura 3. 7: Evolução da resistência à compressão simples para diferentes tipos de cimento .	75
Figura 3. 8: Programa dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral .....	76
Figura 3. 9: Programa dos ensaios de compressão triaxial.....	77
Figura 3. 10: Programa dos ensaios de lixiviado e solubilizado .....	77
Figura 3. 11: molde tripartido e a prensa.....	78
Figura 3. 12: Prensa hidráulica Shimadzu .....	79
Figura 3. 13: Prensa hidráulica Shimadzu .....	80
Figura 3. 14: Aparelho o triaxial da IPC Global.....	82
Figura 3. 15: Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	83
Figura 3. 16: Diagrama p'x q de Cambridge para (a) solo coesivo e (b) solo não coesivo.....	83
Figura 4. 1: Variabilidade o peso específico real dos grãos por região e profundidade.....	85
Figura 4. 2: Curvas granulométricas de resíduo de bauxita de deferentes regiões e profundidades. ....	87
Figura 4. 3: Comparação dos resultados da DRX das amostras de resíduos de bauxita: (a) exceto Sul – 1,0m e Norte – 0,5m; (b) Sul – 1,0m e Norte – 0,5m .....	89
Figura 4. 4: Fração grossa do resíduo de bauxita .....	92
Figura 4. 5: Curva de compactação na energia Proctor normal.....	93
Figura 4. 6: Concentração de: (a) manganês no extrato de lixiviado com 0%, 2% e 6%; (b) concentração de zinco extrato de lixiviado com 0%, 2% e 6% .....	96
Figura 4. 7: Concentração de: (a) ferro no extrato de solubilizado com 0%, 2% e 6%; (b) concentração de cromo no extrato de solubilizado com 0%, 2% e 6% .....	97
Figura 4. 8: Resistências à compressão simples ( $q_u$ ) em função do teor de cimento ( $C_i$ ). .....	98
Figura 4. 9: Resistências à compressão simples ( $q_u$ ) em função da porosidade ( $\eta$ ). .....	99
Figura 4. 10: Relação entre o parâmetro $\eta/C_{iv}$ e a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) .....	100

Figura 4. 11: Resistências à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) em função do teor de cimento ( $C_i$ ). .....	102
Figura 4. 12: Resistências à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) em função da porosidade ( $\eta$ ). .....	103
Figura 4. 13: Relação entre o parâmetro $\eta/C_{iv}$ e a resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ).....	104
Figura 4. 14: Resistência à tração por compressão diametral em função da resistência a compressão simples .....	106
Figura 4. 15:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% de cimento Portland .....	108
Figura 4. 16:Cp's não cimentados após ensaio triaxial: (a) tensão confinante 100kPa; (b) tensão confinante 200kPa; (c) tensão confinante 300kPa. ....	109
Figura 4. 17:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 2% de cimento Portland .....	110
Figura 4. 18:Cp's cimentados após ensaio triaxial: (a) tensão confinante 100kPa; (b) tensão confinante 200kPa; (c) tensão confinante 300kPa.....	110
Figura 4. 19: Incrementos da tensão desviadora de pico com a adição de cimento para diferentes tensões de confinamento .....	112
Figura 4. 20: Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 100 kPa .....	113
Figura 4. 21:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 200 kPa .....	114
Figura 4. 22: Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 300 kPa .....	114
Figura 4. 23: Trajetórias de tensões efetivas, no espaço $q$ x $p'$ : (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland .....	115
Figura 4. 24: Envoltórias de Mohr-Coulomb: (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland.....	117
Figura 4. 25: Curvas tensão x deformação axial normalizados: (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland .....	118

Figura 4. 26: Relação entre o parâmetro $\eta/C_{iv}$ e o intercepto coesivo efetivo de pico ( $c_p$ ) para o método de Consoli (2014) .....	119
Figura 4. 27: Envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb de resíduo de bauxita cimentado obtidas por meio dos ensaios triaxiais e por meio de métodos de estimativa. ....	122
Figura 4. 28: Seção transversal da pilha: (a) cenário PC1 (b) cenário PC2. ....	124
Figura 4. 29: Detalhe do sistema de vedação e drenage .....	125
Figura A. 1: Gráficos de padrão de difração – Amostra Norte 0,5 m .....	148
Figura A. 2: Gráficos de padrão de difração – Amostra Norte 1,0 m .....	148
Figura A. 3: Gráficos de padrão de difração – Amostra Sul 0,5 m .....	149
Figura A. 4: Gráficos de padrão de difração – Amostra Sul 1,0 m .....	149
Figura A. 5: Gráficos de padrão de difração – Amostra Leste 0,5 m .....	150
Figura A. 6: Gráficos de padrão de difração – Amostra Leste 1,0 m .....	150
Figura A. 7: Gráficos de padrão de difração – Amostra Oeste 0,5 m .....	151
Figura A. 8: Gráficos de padrão de difração – Amostra Oeste 1,0 m .....	151
Figura C. 1: Cenário PC1 – Final de Construção: (a) ruptura localizada sem Ru; (b) ruptura global sem Ru; (c) ruptura localizada com Ru; (d) ruptura global com Ru. ....	155
Figura C. 2: Cenário PC1 – Solicitação Sísmica (0,131g): (a) ruptura localizada sem Ru; (b) ruptura global sem Ru; (c) ruptura localizada com Ru; (d) ruptura global com Ru.....	157
Figura C. 3: Cenário PC2 – Final de Construção: (a) ruptura localizada sem Ru; (b) ruptura global sem Ru; (c) ruptura localizada com Ru; (d) ruptura global com Ru. ....	159
Figura C. 4: Cenário PC2 – Solicitação Sísmica (0,131g): (a) ruptura localizada sem Ru; (b) ruptura global sem Ru; (c) ruptura localizada com Ru; (d) ruptura global com Ru.....	161

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1: Componentes químicos encontrados em resíduo de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo.....	32
Tabela 2. 2: Componentes mineralógicos típicos encontrados em resíduo de bauxita .....	33
Tabela 2. 3: Propriedades físicas apresentadas por resíduo de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo.....	35
Tabela 2. 4: Coeficiente de permeabilidade dos resíduos de mineração .....	38
Tabela 2. 5: Parâmetro de resistência para resíduos de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo .....	39
Tabela 2. 6: Principais características da disposição dos resíduos nas concentrações de polpa, espessados, pasta e torta .....	41
Tabela 2. 7: Previsão da quantidade de cimento Portland em função do tipo de solo .....	58
Tabela 2. 8: Previsão da quantidade de cimento Portland em função do tipo de solo .....	59
Tabela 3. 1: Tipologia e classificação da pesquisa científica .....	71
Tabela 3. 2: Ensaio de caracterização .....	73
Tabela 3. 3: Variáveis controladas .....	74
Tabela 3. 4: Variáveis fixadas .....	74
Tabela 3. 5: Variáveis de resposta .....	74
Tabela 3. 6: Variáveis de ruído.....	74
Tabela 4. 1: Identificação das amostras.....	85
Tabela 4. 2: Peso específico real dos grãos de resíduo de bauxita .....	86
Tabela 4. 3: Granulometria do resíduo de bauxita de diferentes regiões .....	87
Tabela 4. 4: Limite de consistência apresentadas por resíduo de bauxita .....	88
Tabela 4. 5: Resumo das propriedades físicas e químicas do resíduo bauxita .....	91
Tabela 4. 6: Resultados do ensaio de compactação na energia Proctor normal .....	92
Tabela 4. 7: Análise do lixiviado do resíduo de bauxita .....	94
Tabela 4. 8: Análise do solubilizado do resíduo de bauxita .....	94
Tabela 4. 9: Características dos CP's submetidos aos ensaios triaxiais monotônicos do tipo CIU .....	107
Tabela 4. 10: Resultados dos ensaios triaxiais monotônicos do tipo CIU em resíduo de bauxita puro e melhorado com 2% de cimento. ....	107

Tabela 4. 11: Parâmetros geotécnicos do resíduo de bauxita no estado de pico e pós pico ....	116
Tabela 4. 12: Resumo da aplicação do método Consoli (2014) .....	121
Tabela 4. 13: Resumo da aplicação do método Schnaid, Prietto e Consoli (2001).....	122
Tabela 4. 14: Acelerações horizontais máximas. ....	123
Tabela 4. 15: Dados da geometria da seção transversal das pilhas .....	124
Tabela 4. 16: Parâmetros adotados .....	126
Tabela 4. 17: Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade .....	127
Tabela B. 1: Resultados de $q_u$ para $\gamma_d$ de 18, 19 e 20 kNm <sup>3</sup> e 7 dias de cura com teor de cimento variando em 2% 4% e 6%.....	152
Tabela B. 2: Resultados de $q_t$ para $\gamma_d$ de 18, 19 e 20 kNm <sup>3</sup> e 7 dias de cura com teor de cimento variando em 2% 4% e 6%.....	153

## LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
ARB	Áreas de Resíduo de Bauxita
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CC	Coefficiente de curvatura
$C_c$	Índice de compressão
$C_r$	Índice de recompressão
$C_d$	Índice de descarga
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CIU	Ensaio triaxiais consolidados isotropicamente não drenados
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CP V - ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CU	Coefficiente de uniformidade
D10	Diâmetro do grão correspondente a 10 % mais fino
D30	Diâmetro do grão correspondente a 30 % mais fino
D60	Diâmetro do grão correspondente a 60 % mais fino
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raio X
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
IP	Índice de Plasticidade
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
$kN/m^3$	Quilo Newton por metro cúbico
kPa	Quilo Pascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MME	Ministério de Minas e Energia

MPa	Mega Pascal
mm	milímetros
m <sup>2</sup> /g	Massa quadrado por grama
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
PGA	<i>Peak ground acceleration</i>
RB	Resíduo de Bauxita
RCS	Resistência à Compressão Simples
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SMEWW	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>
TRB	Transportation Research Board
µm	micrómetro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$	Sodalita
Al	Alumínio
Al(OH) <sub>3</sub>	Gibbista
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
AlO(OH)	Boehmita / Diásporo
B	Coefficiente externo
c	Intercepto coesivo
c'	Intercepto coesivo efetivo
C <sub>i</sub>	Teor de cimento
C <sub>iv</sub>	Teor volumétrico de cimento
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Cr	Cromo
d	Diametro
e	Índice de vazios
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro / Hematita
h	Altura
k	Expoente de ajuste
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
M	Inclinações das envoltórias de ruptura
Mn	Manganês
Na(Al(OH) <sub>4</sub> )	Aluminato de sódio
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Criolita fundida
NaOH	Hidróxido de sódio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
p'	Tensão média efetiva
p' <sub>0</sub>	Tensão média efetiva inicial
q	Tensão de cisalhamento
Q	Carregamento axial

$q_u$	Resistência à Compressão Simples
$q_t$	Resistência à Tração por Compressão Diametral
$q_{un}$	Resistência à Compressão Simples normalizado
$R^2$	Coefficiente de Determinação
$R_u$	Parâmetro de poropressão
$Si$	Silício
$SiO_2$	Dióxido de Silício / Sílica
$Sumin$	Resistência não drenada mínima
$S_u/\sigma'_v$	Razão de resistência.
$TT$	Tensões totais
$TE$	Tensões efetivas
$TR$	Tempo de retorno
$w$	Teor de umidade
$Zn$	Zinco
$\tau_f$	Tensão cisalhante na ruptura
$\sigma'_f$	Tensão normal efetiva na ruptura
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$\sigma_1$	Tensão máxima de resistência
$\sigma_3$	Tensão confinante
$\epsilon_a$	Deformação axial
$\Delta u$	Excesso de poropressão.
$\phi$	Ângulo de atrito interno
$\phi'$	Ângulo de atrito interno efetivo
$\eta$	Porosidade
$\eta/C_{iv}$	Porosidade/teor volumétrico de cimento
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>25</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	25
1.1.2 Objetivos específicos .....	25
<b>1.2 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>25</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Bauxita.....</b>	<b>27</b>
2.1.1 Reserva global de bauxita.....	27
2.1.2 Processo de produção de alumínio e geração de resíduo de bauxita.....	28
2.1.2.1 Mineração .....	28
2.1.2.2 Refino .....	29
2.1.2.3 Redução .....	30
<b>2.2 Resíduo de mineração de bauxita.....</b>	<b>31</b>
2.2.1 Propriedades químicas do resíduo de bauxita.....	32
2.2.2 Propriedades mineralógicas do resíduo de bauxita.....	33
2.2.3 Propriedades físicas do resíduo de bauxita.....	33
2.2.4 Resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita.....	38
<b>2.3 Métodos de disposição .....</b>	<b>40</b>
<b>2.4 Armazenamento de resíduo de mineração .....</b>	<b>42</b>
2.4.1 Armazenamento em barragem de contenção.....	42
2.4.2 Armazenamento por empilhamento drenado.....	46
2.4.3 Armazenamento por empilhamento a seco (método <i>dry stacking</i> ) .....	47
<b>2.5 Melhoramento de geomateriais .....</b>	<b>49</b>
2.5.1 Técnica Solo-Cimento .....	51
2.5.2 Química da estabilização solo-cimento .....	52
2.5.3 Fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do geomaterial melhorado .....	53
2.5.3.1 Efeito do teor do cimento .....	53
2.5.3.2 Efeito do teor de umidade.....	56
2.5.3.3 Efeito da porosidade da mistura .....	56
2.5.4 Dosagem do solo-Cimento .....	58
<b>2.6 Comportamento mecânico de geomaterial cimentado .....</b>	<b>61</b>
2.6.1 Resistência à compressão simples e tração por compressão diametral .....	61
2.6.2 Resistência ao cisalhamento e tensão-deformação .....	61
<b>2.7 Estimativa dos parâmetros de resistência de geomaterial cimentado .....</b>	<b>65</b>
2.7.1 Métodos Consoli (2014) – estimativa de $c'$ e $\phi'$ .....	65
2.7.2 Métodos Mitchell (1981) – estimativa de $c'$ e $\phi'$ .....	67
2.7.3 Método de Schnaid, Prietto e Consoli (2001) – estimativa de tensão desviadores de ruptura (pico).....	67
<b>3. MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>68</b>
3.1.1 Resíduo de mineração de bauxita .....	68
3.1.2 Cimento Portland de alta resistência inicial CP V – ARI.....	70

3.1.3	Água .....	71
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>71</b>
3.2.1	Caracterização do material .....	72
3.2.2	Planejamento experimental.....	74
3.2.3	Moldagem dos Corpos de Prova.....	78
3.2.4	Ensaio de resistência à compressão simples.....	79
3.2.5	Ensaio de tração por compressão diametral .....	80
3.2.6	Ensaio de compressão triaxial .....	80
3.2.7	Análise de estabilidade das pilhas .....	84
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise da variabilidade espacial do resíduo depositado na ARB 6.....</b>	<b>85</b>
4.1.1	Peso específico real dos grãos .....	85
4.1.2	Distribuição de granulometria .....	86
4.1.3	Limite de consistência (Limites de Atterberg) .....	88
4.1.4	Difratometria de raios-X (DRX) .....	88
<b>4.2</b>	<b>Caracterização do resíduo de bauxita estudado .....</b>	<b>90</b>
4.2.1	Ensaio de Compactação.....	92
4.2.2	Análise do lixiviado e solubilizado .....	93
<b>4.3</b>	<b>Análise do encapsulamento de metais.....</b>	<b>95</b>
<b>4.4</b>	<b>Resistência à compressão simples (RCS).....</b>	<b>97</b>
4.4.1	Efeito do teor de cimento.....	97
4.4.2	Efeito da porosidade .....	99
4.4.3	Relação $\eta/C_{iv}$ para previsão de $q_u$ .....	100
<b>4.5</b>	<b>Resistência à tração por compressão diametral (RTCD).....</b>	<b>101</b>
4.5.1	Efeito do teor de cimento.....	101
4.5.2	Efeito da porosidade .....	102
4.5.3	Relação $\eta/C_{iv}$ para previsão de $q_t$ .....	104
<b>4.6</b>	<b>Relação <math>qt/q_u</math> .....</b>	<b>105</b>
<b>4.7</b>	<b>Ensaio triaxiais consolidados isotropicamente não drenados (CIU).....</b>	<b>106</b>
4.7.1	Efeito da tensão de confinamento no comportamento tensão x deformação .	107
4.7.2	Efeito da adição do cimento no comportamento tensão x deformação .....	111
4.7.3	Trajatória de tensões .....	115
4.7.4	Comportamento tensão-deformação normalizado.....	118
<b>4.8</b>	<b>Estimativa de parâmetros de resistência de resíduo de bauxita cimentado....</b>	<b>119</b>
4.8.1	Aplicação do método Consoli (2014).....	119
4.8.2	Aplicação do método Mitchell (1981).....	120
4.8.3	Aplicação do método de Schnaid, Prietto e Consoli (2001).....	120
4.8.4	Relação entre os valores estimados e os obtidos nos ensaios.....	121
<b>4.9</b>	<b>Análise de estabilidade das pilhas .....</b>	<b>123</b>
4.9.1	Considerações iniciais .....	123
4.9.2	Geometria das pilhas .....	123
4.9.3	Parâmetros de resistência adotados .....	126
4.9.4	Resultado das análises .....	127
4.9.5	Impacto do uso do cimento na zona estrutural da pilha de resíduo .....	128
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>130</b>

<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>131</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>147</b>
<b>Anexo A – Gráficos de padrão de difração – DRX.....</b>	<b>148</b>
<b>Anexo B –Resistências a compressão simples e tração por compressão diametral ....</b>	<b>152</b>
<b>Anexo C –Análises de estabilidade das pilhas.....</b>	<b>154</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os resíduos de mineração são materiais resultantes da extração e processamento de mineração que normalmente são descartados. Esses resíduos podem ser altamente tóxicos, e causar danos ambientais significativos se não forem devidamente gerenciados. Por isso se torna imperativo boa gestão desses materiais. Contudo, encontrar uma melhor forma de lidar com esse material tem sido um grande desafio para a indústria de mineração. Segundo Consoli *et al.* (2023), os resíduos de mineração apresentam normalmente uma consistência de pasta aquosa devido à quantidade considerável de água utilizada para processamento de minério. Dado a isso a sua deposição em grandes reservatórios denominados de barragens de resíduos tem sido o método mais comum de armazenamento.

Nas últimas duas décadas, segundo Zhang *et al.* (2021), a produção de óxido de alumina experimentou um rápido crescimento em todo o mundo devido a industrialização e urbanização mundial, o que por sua vez acelera a geração resíduo de bauxita descartada durante os processos de extração e refino de bauxita. De acordo com a *International Aluminium Institute* – IAI (2022) aproximadamente 4 a 6 toneladas de bauxita são necessárias para fazer 1 tonelada de alumínio.

O aumento da demanda por materiais oriundos do processo de mineração, surge a necessidade de mais espaço para o armazenamento de resíduos resultantes. Por conta disso, a ampliação de barragens de resíduos existentes, se mostrou atrativa (Consoli *et al.*, 2022a). Dentre as opções de ampliação tem-se o alteamento pelo método a montante. Esse método apesar da sua aparente viabilidade econômica e facilidade de execução, no recente contexto revelou-se ser de baixa segurança estrutural e ambiental. Nos últimos 25 anos, conforme destacado por *WISE Uranium Project* (2024), foram registradas mais de 80 rupturas de barragens de resíduos em diferentes partes do mundo. Entre esses eventos, destacam-se o desastre de Mariana em 2015 e o desastre de Brumadinho em 2019, ambos ocorridos no Brasil, resultando em significativos impactos sociais, econômicos e ambientais. Esses dois incidentes, em conjunto, resultaram na liberação de mais de 60 milhões de metros cúbicos de resíduos de mineração, causando a perda de 315 vidas, como relatado por Bruschi *et al.* (2021). Devido a esses eventos, foi estabelecido pela resolução ANM (Agência Nacional de Mineração) nº 13/2019, a Lei nº 12.334/2010 em seu Art. 2º a proibição da construção ou alteamento de barragens pelo método a montante.

Apesar das controvérsias e problemas ambientais associados à exploração mineral, grande parte da economia mundial ainda depende da indústria de mineração. Esta indústria

fornece sustento para mais de 30 milhões de trabalhadores em todo o mundo (Consoli *et al.*, 2022). Dessa forma se tornou mais urgente o desenvolvimento de métodos seguros, eficazes, e sustentáveis como alternativa para barragens de montante. Segundo Ulrich (2019), em virtude da participação ativa da sociedade com relação a segurança de barragens e os avanços nas regulamentações e fiscalizações, empresas do setor industrial e de mineração passaram a intensificar suas buscas por técnicas mais seguras e sustentáveis de disposição de resíduo.

Com o avanço nas tecnologias de desidratação têm permitido o uso de métodos de disposição baseados na alocação de resíduos filtrados, com alternativa a deposição hidráulica em barragens de contenção. Segundo Consoli *et al.* (2022b), o método de disposição e armazenamento de resíduo em pilhas secas “*Dry stacking*” está sendo cada vez mais utilizado por mineradoras no Brasil e em outras indústrias que produzem grandes quantidades de resíduos como solução potencial para reduzir o risco de ruptura catastrófica de barragem e escoamento de resíduos. Esse método envolve a redução do teor de água dos resíduos, aumentando assim a estabilidade do material e reduzindo o risco de contaminação do solo e da água. Além disso, esse método permite uma maior taxa de recuperação de água de processo. Essa característica torna essa alternativa ainda mais atrativa uma vez que segundo Alves (2020), o uso sustentável da água vem se tornado uma demanda cada vez mais constante nos empreendimentos mineiros. Entretanto, por ser uma metodologia recente, ainda há muito que se aprender a respeito dessa prática.

Tipicamente, o sistema de armazenamento de resíduo em pilhas secas apresenta dois setores: o primeiro onde o resíduo filtrado é compactado em camadas, e o segundo onde o material não é submetido ao processo de compactação. O setor compactado funciona como um dique para conter o resíduo filtrado não compactado (Lupo e Hall, 2010). É relevante salientar que cada tipo de resíduo pode exibir comportamentos distintos, dependendo da região e até mesmo da usina, conforme indicado por Villar *et al.* (2009) e Consoli *et al.* (2022a). Nesse sentido, Lupo e Hall (2011) enfatizam a importância de considerar as propriedades geotécnicas dos resíduos nos projetos de instalações de pilhas secas. Para assegurar uma maior segurança e estabilidade das pilhas de resíduo, a estabilização química está sendo estudada e aplicada com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico do resíduo compactado (Consoli *et al.*, 2022). Além de promover maior segurança, a melhoria do comportamento mecânico do resíduo abre possibilidades para o desenvolvimento de estruturas mais altas, com maior capacidade de armazenamento, reduzindo assim a área necessária para o armazenamento de resíduos por parte

das mineradoras. Nesse sentido, o presente projeto surge com a proposta de avaliar o efeito da aplicação do cimento no comportamento geomecânico do resíduo de bauxita compactado.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como enfoque avaliar o comportamento geomecânico e ambiental do resíduo de mineração de bauxita melhorado com cimento Portland.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, estão estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar variabilidade espacial do resíduo de bauxita na área de deposição de resíduo de bauxita;
- Avaliar o comportamento tensão-deformação e excesso de poropressão-deformação axial do resíduo de mineração de bauxita;
- Averiguar os efeitos da adição do cimento Portland no comportamento ambiental e mecânico do resíduo;
- Verificar a influência da porosidade e do teor de cimento na resistência mecânica do resíduo de bauxita;
- Examinar a aplicabilidade da relação  $\eta/C_{iv}$  (porosidade/teor volumétrico de cimento) na previsão do comportamento mecânico das misturas do resíduo de bauxita com cimento;
- Aferir o impacto da adição do cimento Portland na zona estrutural de uma pilha de resíduo de bauxita.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura desse trabalho está dividida em cinco itens principais:

- **Introdução:** é retratado de forma breve o conceito básico sobre a mineração e gestão de resíduo, focando principalmente no processo de geração e estocagem de resíduo de mineração de bauxita. No que tange ao processo de estocagem, é abordado os mais atuais e mais usuais métodos de armazenamento de resíduo de mineração no Brasil e no mundo. Também são apresentados as justificativas e os objetivos do trabalho;
- **Referencial teórico:** é exibido de forma mais detalhada, as noções básicas sobre a bauxita e sobre o resíduo gerado devido ao processamento desse mineral durante produção de materiais como alumina e alumínio. Em relação ao resíduo de mineração de bauxita são abordadas questões como as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e geomecânicas. São abordados os diferentes métodos de disposição de

resíduo adotados pelas industriais de mineração no Brasil e no mundo, focando principalmente nas suas vantagens e desvantagens ou limitações. Nesse capítulo são aprofundados os conceitos e os processos do método de empilhamento a seco, que dentre os métodos de deposição de resíduo é o considerado como o mais sustentável. Para finalizar o capítulo é retratado a questão do melhoramento de solo e resíduo de mineração com adição de cimento, e dos fatores que influenciam no comportamento geomecânico;

- **Materiais e métodos:** é descrito de forma clara os materiais usados e os procedimentos seguidos na coleta, secagem e caracterização do material. Também são retratados o todo o planejamento experimental e os procedimentos seguidos para o desenvolvimento dos ensaios de resposta;
- **Resultados e discussão:** são expostos os resultados obtidos dos ensaios de caracterização e resposta. Além disso também são apresentados os resultados da análise de estabilidade desenvolvido usando como dados de entrada os resultados dos ensaios de resposta, assim como o comparativo desses mesmos resultados com os dados da literatura;
- **Considerações finais:** expõe as conclusões e as considerações do estudo desenvolvido, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 BAUXITA**

A bauxita é um dos recursos naturais mais importantes para a produção de alumínio (Zhang *et al.* 2021). De acordo com Alves (2017), esse minério contém cerca de 40 a 60% em massa de  $Al_2O_3$  combinada com uma pequena quantidade de óxidos, que são as impurezas. Apresenta na sua constituição minerais como a gibbissita ( $Al(OH)_3$ ), boehmita ( $AlO(OH)$ ) ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) e diásporo ( $AlO(OH)$ ). Segundo a CETEM (2005), dependendo da proporção dos óxidos de ferro a bauxita pode apresentar uma coloração branca (contém de 2 a 4% de óxidos de ferro) ou vermelha (proporção atinge 25%). Alves (2017), destaca que a bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Ela é formada a partir da decomposição química de rochas que contêm silicatos de alumínio, em condições climáticas quentes e úmidas. A formação da bauxita geralmente ocorre em áreas tropicais ou subtropicais, onde o clima quente e úmido favorece a formação de solos ácidos ricos em alumínio.

A bauxita é um recurso mineral valioso, mas a mineração pode ter impactos significativos no meio ambiente, como o desmatamento, a erosão do solo, a contaminação do ar e da água e a perda de habitat de espécies animais. Por isso, é importante que as empresas adotem práticas sustentáveis e responsáveis em todas as etapas do processo de mineração de bauxita, incluindo a implementação de medidas de mitigação para reduzir o impacto ambiental da mineração.

#### **2.1.1 Reserva global de bauxita**

As reservas de bauxita no mundo são amplas, mas a maioria está concentrada em poucos países. Segundo Bray (2022), estima-se que as reservas mundiais de bauxita representam um montante de 32 bilhões de toneladas, em valores aproximados, dos quais 72,5% estão distribuídos em cinco países. De entre esses países, 7,4 bilhões de toneladas estão localizadas na Guiné, 5,8 bilhões no Vietnã, 5,3 bilhões na Austrália, 2,7 bilhões no Brasil, e 2 bilhões na Jamaica. Desse modo, o Brasil possui a quarta maior reserva mundial de bauxita, correspondendo a quase 8,5% do total das reservas mundiais (Bray, 2022)

A quantidade de bauxita disponível em cada país varia de acordo com a geologia local, com o grau de exploração e desenvolvimento do setor de mineração do país. Segundo a *International Aluminium Institute – IAI* (2022) aproximadamente 4 a 6 toneladas de bauxita são necessárias para fazer 1 tonelada de alumínio. E ela só é considerada economicamente viável se apresentar um teor de pelo menos 30% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) (MME, 2022).

Com relação às reservas de bauxita no Brasil, verifica-se que estão concentradas em um número reduzido de regiões, principalmente no Pará, em Minas Gerais e em Goiás. No território paraense, concentram-se reservas que somam cerca de 2,23 bilhões de toneladas. Minas Gerais estima-se possuir 342 milhões de toneladas e em Goiás 76,2 milhões de toneladas de bauxita. Unidas as reservas desses três estados, estas representam 98,9% de todos os depósitos nacionais de bauxita (MME, 2022).

O Ministério de Minas e Energia – MME (2022) ressalta que cerca de 98% do total extraído de bauxita possui como destino as refinarias de alumina. Também é destacado que no Brasil, as principais empresas que atuam no setor são a Norsk Hydro Brasil LTDA., a Alcoa e a South32 Minerals S.A. (South32), que detêm, em conjunto, aproximadamente 89% da produção total da alumina no País.

### 2.1.2 Processo de produção de alumínio e geração de resíduo de bauxita

O alumínio não é encontrado diretamente em estado metálico na crosta terrestre. A sua obtenção começa com a mineração da bauxita e seguida por etapas de refinação e redução (IAI, 2022). Os vários processos desenvolvidos desde a mineração até a produto acabado (alumina e alumínio) variam de empresa para empresa e entre os processos é gerado o resíduo de bauxita. Na Figura 2.1 encontra-se ilustrado o esquema do processo de produção de alumina e alumínio e consequentemente a geração do resíduo de bauxita.

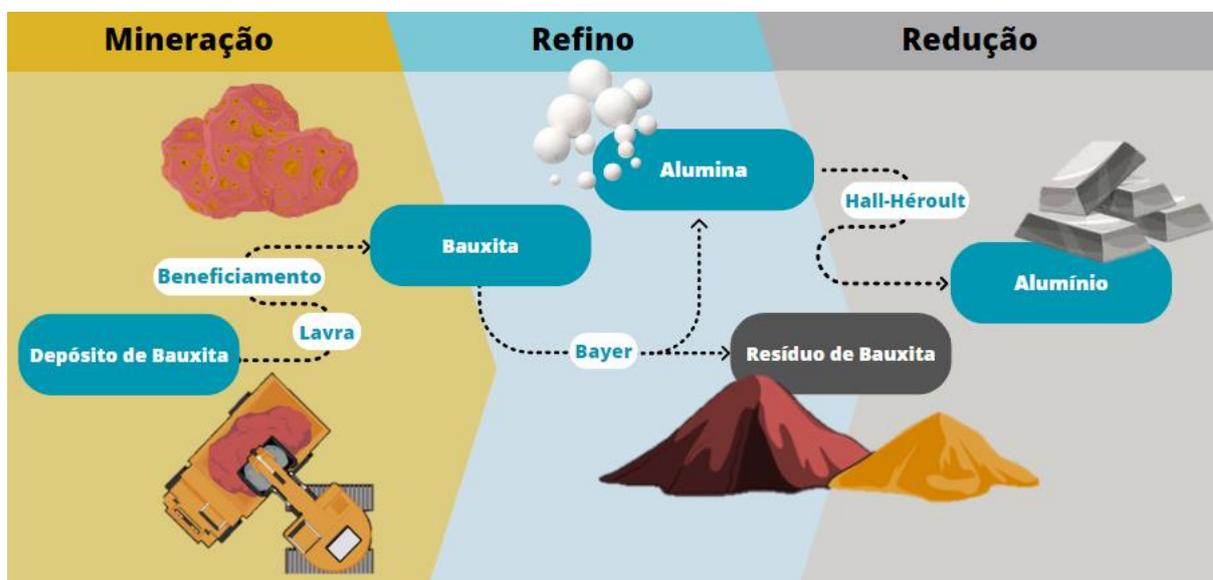


Figura 2. 1: Processo de produção de alumínio e geração de resíduo de bauxita  
Fonte: Autor (2024)

#### 2.1.2.1 Mineração

Na fase de mineração a bauxita passa por dois processos: a lavra, e o beneficiamento

##### a) Lavra da bauxita

O processo de lavra da bauxita envolve várias etapas, que podem variar dependendo do tipo de depósito de bauxita e das condições locais. De acordo com IAI (2022) de modo geral, o processo de lavra da bauxita pode ser dividido em três etapas principais:

- 1°. **Etapa:** Preparação do terreno – envolve a remoção da vegetação e em seguida é feita a retirada das camadas superficiais de solo e argila;
- 2°. **Etapa:** Extração da Bauxita – abrange a escavação da bauxita por métodos mecânicos ou, em alguns casos, perfuração e explosão;
- 3°. **Etapa:** Transporte – Depois que a bauxita é extraída, ela é levada para a usina de beneficiamento, onde é processada para produzir alumina e, em seguida, alumínio. Geralmente o transporte é feito por meio de caminhões e correias transportadoras.

**b) Beneficiamento da bauxita**

O processo de beneficiamento de bauxita prepara a bauxita para uso em processos metalúrgicos. Do ponto de vista da IAI (2022), o beneficiamento é um processo relativamente simples que envolve etapas como:

- 1°. **Etapa:** Lavagem e peneiramento – a bauxita é lavada e peneirada para remover impurezas como argila e areia;
- 2°. **Etapa:** Britagem – a bauxita é então britada e moída em partículas finas;
- 3°. **Etapa:** Separação magnética – a separação magnética é utilizada para remover minerais paramagnéticos, reduzindo os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ .

O processo de beneficiamento visa melhorar a qualidade do minério por meio da remoção de impurezas, resultando na produção de um minério concentrado que possa ser utilizado em processos de produção de alumínio, como o processo Bayer (IAI, 2022).

**2.1.2.2 Refino**

Na fase de Refino a bauxita passa pelo processo de extração de alumina (óxido de alumínio) da bauxita. Segundo Zhang *et al.* (2021), devido à diferença em termos de conteúdo mineral dos recursos da bauxita, existem hoje diferentes métodos industriais de extração desenvolvidos, incluindo o processo Bayer, o processo de sinterização e o processo combinado de sinterização Bayer. Dentre esses métodos, o processo Bayer ilustrado na Figura 2.2 é o mais comumente utilizado para a produção comercial de alumina (Zhang *et al.* 2021). Esse método foi desenvolvido por Karl Josef Bayer na década de 1880. Segundo Alves (2017), o processo de Bayer envolve as seguintes etapas:

- 1°. **Etapa:** Digestão – a bauxita é misturada com hidróxido de sódio (NaOH) e submetida à digestão química em um tanque de pressão chamado de digestor. Neste processo, a alumina presente na bauxita é dissolvida no hidróxido de sódio sob alta temperatura e

pressão formando uma solução de aluminato de sódio ( $\text{Na}(\text{Al}(\text{OH})_4)$ ), enquanto as impurezas (Resíduo de Bauxita) permanecem na fase sólida;

- 2°. **Etapa:** Clarificação – ocorre a separação entre as fases sólida (Resíduo de Bauxita) e líquida (licor rico contendo aluminato de sódio). Primeiramente, a solução é passada por peneiras para remover grandes partículas sólidas. Em seguida, é filtrada através de filtros de pressão para remover as partículas sólidas menores. Após a clarificação, a solução se torna mais clara;
- 3°. **Etapa:** Precipitação – a solução clarificada é resfriada para uma temperatura inferior a  $10^\circ\text{C}$ , e alumina é precipitada na forma de hidróxido de alumínio;
- 4°. **Etapa:** Calcinação – o hidróxido de alumínio precipitado é calcinado a uma temperatura superior a  $1000^\circ\text{C}$ , transformando-o em alumina por meio de perda de água.



Figura 2. 2: Processo de Bayer  
Fonte: Adaptado de IAI (2022)

Durante o processo de Bayer a alumina é separada da solução alcalina gerando assim grandes quantidades de resíduo. Por serem materiais corrosivos e com altas concentrações de metais pesados, esses resíduos gerados acabam representando um dos maiores desafios ambientais associados ao processo Bayer. Hoje em dia a maioria das indústrias de mineração armazenam esse material em grandes reservatórios, denominado de barragens de resíduos, que podem cobrir áreas extensas.

#### 2.1.2.3 Redução

Na fase de redução a alumina gerada no processo anterior passa pelo processo de Hall-Héroult. Esse processo, é um método eletrolítico utilizado para a produção de alumínio. Van Horn (2018) frisa que o processo foi desenvolvido independentemente por dois químicos: o americano Charles Martin Hall e o francês Paul Héroult em 1886. Segundo Van Horn (2018), o processo envolve:

- 1º. Etapa:** Dissolução da alumina – a alumina é dissolvida em criolita fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) a temperaturas elevadas (aproximadamente  $950^\circ\text{C}$ ). A criolita é usada como solvente para a alumina porque a alumina não se dissolve facilmente em água ou outros solventes;
- 2º. Etapa:** Eletrólise – a solução de alumina e criolita é eletricamente carregada, passando uma corrente elétrica através dela. A corrente elétrica é fornecida por eletrodos de grafite que são imersos na solução;
- 3º. Etapa:** Redução do alumínio – quando a corrente elétrica é passada pela solução, ocorre a eletrólise, que separa a alumina em seus componentes de alumínio e oxigênio. O alumínio líquido é produzido no cátodo e é coletado em grandes tanques de fundição. O oxigênio é produzido no ânodo e reage com o carbono do ânodo para formar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que é liberado para a atmosfera;
- 4º. Etapa:** Refino do alumínio – o alumínio produzido através do processo Hall-Héroult contém impurezas, como ferro e silício. O alumínio é refinado para remover essas impurezas e produzir alumínio de alta pureza;
- 5º. Etapa:** Moldagem do alumínio: o alumínio refinado é moldado em lingotes ou peças para uso em diversos produtos.

O processo Hall-Héroult é o método mais comum de produção de alumínio em larga escala. É um processo altamente eficiente, pois permite a produção de alumínio de alta pureza a partir da alumina. Contudo, o processo consome grandes quantidades de energia elétrica, tornando a produção de alumínio um processo caro (Horn, 2018). Do ponto de vista de Sampaio (2005), a produção de alumínio é a que mais demanda energia entre todos os processos metalúrgicos. Esses argumentos justificam a localização das unidades industriais, para produção de alumínio metálico, próximas às hidrelétricas, às minas de carvão, ou mesmo nos países onde há energia elétrica com abundância e baixo custo.

As três fases destacadas anteriormente são essenciais para a produção de alumina e alumínio em escala industrial. No entanto, é importante que as empresas adotem práticas sustentáveis em todas as etapas do processo, desde a extração da bauxita até a produção de produtos acabados, a fim de minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde das comunidades locais.

## 2.2 RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE BAUXITA

Os resíduos de bauxita são materiais resultantes do processo de extração da alumina por meio do processo Bayer. Segundo IAI (2015) dependendo das fontes da bauxita e, das condições de extração utilizadas pela usina, a quantidade de resíduo de bauxita produzida na

refinaria de alumina pode ser variada. De acordo com Alam *et al.* (2019), a taxa de geração de resíduo de bauxita é muito alta.

O processo de Bayer gera um resíduo alcalino devido a presença de NaOH. Na maioria das vezes esse material apresenta elevados teores de alumínio, ferro e outros elementos químicos, bem como compostos inorgânicos, que podem ser prejudiciais à saúde humana e à fauna e flora local se liberados no meio ambiente. O resíduo de bauxita é geralmente fino, no entanto, pode apresentar uma quantidade menor de partículas grossas ou areia (IAI, 2022).

### 2.2.1 Propriedades químicas do resíduo de bauxita

Em relação a composição química o resíduo apresenta elementos principais com Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O e TiO<sub>2</sub> (Liao *et al.*, 2022; Gou, Zhou e Guan, 2021; Zang *et al.*, 2021; Bruschi *et al.*, 2021; Lima e Thives, 2020; Wang *et al.*, 2020; Consoli *et al.*, 2022). Evans (2016), ressalta que a variação na composição do resíduo de bauxita é extremamente ampla, assim como pode ser constatado na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1: Componentes químicos encontrados em resíduo de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo

País	Processo de extração	Principais componentes (%)							Autor
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	
China	Bayer-sinterização	10,05	6,75	22,2	2,55	3,00	--	42,25	(Liu <i>et al.</i> , 2014)
China	Sinterização	8,03	17,54	18,19	4,81	3,21	--	44,64	(Zhang <i>et al.</i> , 2018)
China	Bayer	25,11	36,43	16,93	6,02	12,27	--	1,54	(Zhang <i>et al.</i> , 2018)
China	----	39,46	10,61	37,22	3,74	--	4,14	2,67	(Gou, Zhou e Guan, 2021)
UK	Bayer	23,43	36,31	18,25	5,97	12,36	--	4,38	(Newson <i>et al.</i> , 2006)
Australia	Bayer	7	32	54	1,5	0,3	0,05	0,1	Jitsangiam (2007)
Australia	Bayer	17	36	25	3,7	2,2	0,7	3,5	Jitsangiam (2007)
Espanha	Bayer	19,8	39,23	8,77	10,09	5,05	--	4,54	(Pérez-Villarejo <i>et al.</i> , 2012)
Brasil	----	19,0	38,0	19,9	3,83	8,58	--	0,87	(Hildebrando <i>et al.</i> , 2013)
Brasil	----	21,60	30,40	18,20	5,79	10,90	<0,10	1,47	(Bruschi <i>et al.</i> , 2022)
Brasil	----	35,47	31,45	12,68	5,84	--	--	1,81	(Lima <i>et al.</i> , 2020)
Índia	Bayer	22,36	34,27	8,31	17,13	6,12	--	1,73	(Samal <i>et al.</i> , 2015)
Grécia	----	19,95	40,8	6,80	5,80	2,70	--	12,60	(Tsakiridis <i>et al.</i> , 2004)

Fonte: Autor (2024)

Evans (2016), enfatiza que o sódio é o único elemento não encontrado na própria bauxita. O sódio surge na composição, pois o processo Bayer requer a introdução de soda cáustica como o principal composto na produção de alumina. Por ser essencial no processo as refinarias de alumina tentam maximizar a recuperação de soda cáustica do resíduo para reutilizá-la durante o processo de extração (IAI, 2015). Por isso antes do resíduo passar para o processo de deposição, os materiais residuais de bauxita são lavados e em alguns casos secos em filtros com o intuito de recuperar o licor cáustico do processo Bayer e reduzi-lo no resíduo.

De acordo com IAI (2022), as tecnologias de lavagem e secagem melhoraram desde o início do processo Bayer, há mais de um século, e os resíduos tornaram-se muito mais sólidos e muito mais baixos em cáusticos ao longo desse tempo. De acordo com Newson *et al.* (2006), Alam *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2020), o resíduo de bauxita resultante do processo de Bayer é altamente alcalino, com um pH superior a 11. Dado à sua alta alcalinidade e presença de metais pesados (arsênico, cádmio, níquel, zinco, chumbo, cobre, cromo, vanádio, ferro, gálio, fósforo, manganês, magnésio, tório, nióbio), o resíduo de bauxita é classificado como resíduos perigosos (Lima *et al.*, 2020).

### 2.2.2 Propriedades mineralógicas do resíduo de bauxita

O resíduo de bauxita é composto principalmente de minerais de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Anatase ( $\text{TiO}_2$ ), Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) cristalina e amorfa, Sodalita ( $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), mas também contém sais de sódio associado. Muitos outros minerais são incluídos no resíduo em concentrações menores (Evans, 2016, e Lima *et al.*, 2020), e isso pode ser constatado na Tabela 2.2. Esses componentes em menores concentrações incluem uma ampla gama de outros elementos que variam de acordo com a origem da bauxita.

Tabela 2. 2: Componentes mineralógicos típicos encontrados em resíduo de bauxita

Componentes	Faixa típica (%)
Sodalita ( $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ )	4 – 40
Goethita ( $\text{FeOOH}$ )	10 – 30
Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	10 - 30
Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	0 – 8
Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) cristalina e amorfo	3 – 20
Aluminato de cálcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	2 – 20
Boehmita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ )	0 – 20
Dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) anatase e rutilo	0 – 15
Muscovita ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	0 – 15
Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )	2 – 20
Caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	0 – 5
Gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )	0 – 5
Perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ )	0 – 12
Cancrinita ( $\text{Na} \cdot 6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{CaCO}_3$ )	0 – 50
Diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ )	0 – 5

Fonte: Evans (2016)

### 2.2.3 Propriedades físicas do resíduo de bauxita

O tipo de bauxita, as condições específicas de trituração e o processamento de cada refinaria têm impacto direto nas propriedades físicas de cada resíduo (Liu e Wu, 2012). Isso fica mais evidente quando analisados os resultados apresentados na Tabela 2.3. Nota-se que os resíduos de bauxita geralmente exibem um alto peso específico real dos grãos, na faixa de 27 a 32  $\text{kN/m}^3$ . Schinaid *et al.* (2015), salienta que isso é reflexo do alto teor de ferro dos resíduos.

Conforme observado por Liu e Wu (2012) e Zeng *et al.* (2020), o tamanho médio das partículas de resíduo de bauxita é geralmente inferior a 10  $\mu\text{m}$ , com valores típicos indicando que 90% do volume se encontra abaixo de 75  $\mu\text{m}$ . No entanto, é importante ressaltar que

frequentemente há uma fração significativa de partículas maiores, excedendo 100  $\mu\text{m}$ . Nierwinski (2019) também destacou que o resíduo de bauxita apresenta uma predominância de partículas com diâmetro na faixa dos siltes. Isso pode ser percebido observando a Figura 2.3.

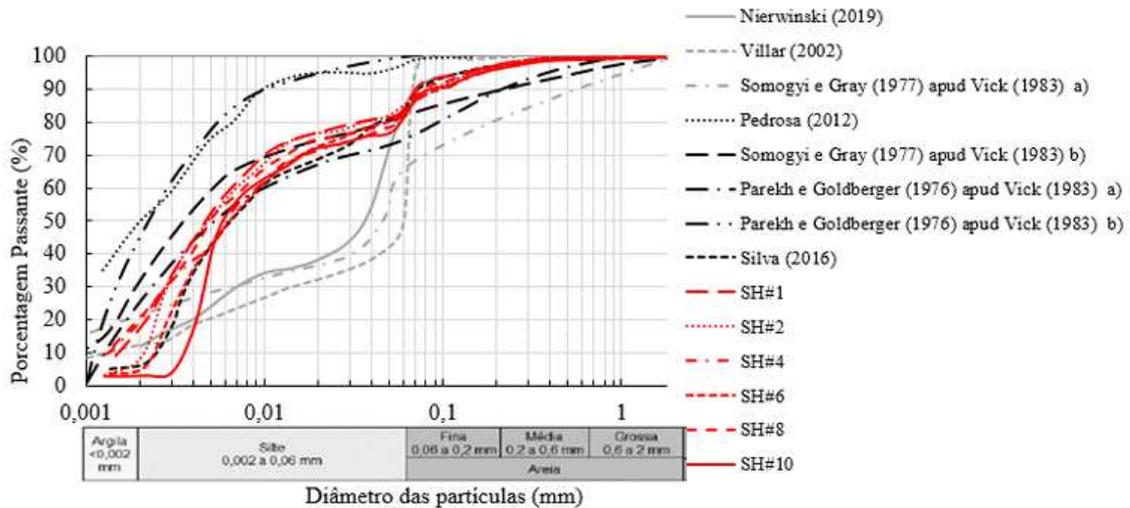


Figura 2. 3: Curvas granulométricas para diferentes resíduos de bauxita  
Fonte: Gonçalves (2021)

Contudo, Jitsongiam (2007) verificou-se em seu estudo que alguns resíduos de bauxita apresentam um elevado percentual de partículas grossa. E com base nos resultados da análise de granulometria, ele classificou o resíduo como uma mistura de areia mal graduada com material silteosos, de acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS). Segundo Vick (1983) e Gonçalves (2021), não existe uma faixa de granulometria pré-definida para os resíduos de mineração, uma vez que a granulometria está diretamente relacionada ao processo de extração da rocha de origem e do beneficiamento do minério. As bauxitas de algumas regiões, como a Austrália Ocidental, são especialmente ricas em areia e em alguns casos, podem representar até 50% do resíduo (IAI, 2022). A fração grossa de resíduo de bauxita com tamanho de partícula maior que 150  $\mu\text{m}$  são denominados de areia vermelha ou *red sand* (Jitsongiam, 2006; Xu *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2021). Conforme apontado por Villar *et al.* (2009), as características dos resíduos de mineração variam consideravelmente de acordo com a região e, em alguns casos, até mesmo em função da usina. Isso se deve, em parte, à ausência de normas industriais que regulamentem a quantidade de substâncias químicas, como flocculantes, que podem ser empregadas no processo industrial.

Tabela 2. 3: Propriedades físicas apresentadas por resíduo de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo

País	Processo de extração	Características físicas									Autor	
		LL	LP	IP	Peso específico real dos grãos	Areia fina	Silte	Argila	Classificação SUCS	Peso específico aparente seco		Umidade optam de compactação (proctor normal)
Brasil	Bayer	37	33	4	31,5kN/m <sup>3</sup>	9%	64%	30%	ML	13,98	33,82%	Bruschi <i>et al.</i> (2021)
Brasil	----	---	---	---	26,1kN/m <sup>3</sup>	15%	65%	20%	----	----	----	Lima <i>et al.</i> (2020)
Brasil	Bayer	30,8	25,7	5,1	30,0 kN/m <sup>3</sup>	8%	91%	1%	ML	----	----	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	38,9	24,9	14	31,5 kN/m <sup>3</sup>	0%	93%	7%	CL	----	----	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	38	35	3	30,6 kN/m <sup>3</sup>	0%	70%	30%	ML	----	----	Nierwinski (2019)
Brasil	Bayer	23	32	9	30,1 kN/m <sup>3</sup>	15%	65%	20%	CL	16,78 kN/m <sup>3</sup>	23,61%	Gonçalves (2021)
Índia	Bayer	---	---	---	33,3 kN/m <sup>3</sup>	5%	81%	14%	----	16,50 kN/m <sup>3</sup>	27%	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	---	---	---	32,7 kN/m <sup>3</sup>	17%	51%	32%	----	15,35 kN/m <sup>3</sup>	30,5%	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	24,75	17,5	7,25	33,4 kN/m <sup>3</sup>	13%	87%	---	ML, CL	19,75 kN/m <sup>3</sup>	18,5%	Rout <i>et al.</i> (2013)
UK	Bayer	54	40	14	30,5 kN/m <sup>3</sup>	---	80%	20%	MH	----	----	Newson <i>et al.</i> (2006)
Australia	Bayer	<25	N/P	N/P	30,3 kN/m <sup>3</sup>	95%	5%	---	SP-SM	16,00 kN/m <sup>3</sup>	20,2%	Jitsongiam (2007)
Guiné	Bayer	62	36	26	36,5 kN/m <sup>3</sup>	10%	90%	---	ML	15,06 kN/m <sup>3</sup>	33%	Gore (2015)
Guiné	Bayer	47	35	12	34,7 kN/m <sup>3</sup>	28%	72%	---	ML	16,34 kN/m <sup>3</sup>	28%	Gore (2015)
China	Sinterização	---	---	---	25,5kN/m <sup>3</sup>	50%	34%	16%	----	----	----	Zhang <i>et al.</i> (2018)
China	Bayer	---	---	---	28,5kN/m <sup>3</sup>	60%	14%	26%	----	----	----	Zhang <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autor (2024)

Liu e Wu (2012), trazem evidências claras da influência do método industrial nas propriedades do resíduo resultante. Segundo eles, do processo de sinterização resulta em resíduos com partículas relativamente grossas (0,1 – 0,02 mm respondendo por 65%), e com maior permeabilidade. Enquanto o resíduo resultante do processo Bayer possui as características de partículas finas (0,01 – 0,005 mm representando 65%) e baixa permeabilidade. Assim, torna-se comum observar variações granulométricas mesmo entre resíduos provenientes da mesma fonte de minério, devido à sua submissão a processos industriais distintos. Esses aspectos evidenciam a impossibilidade de se contar apenas com uma única curva de distribuição granulométrica como referência para prever o comportamento geotécnico desses resíduos.

O método de deposição também tem um grande impacto nas características do resíduo, especialmente a deposição hidráulica (Figura 2.4). Esse método de deposição resulta na formação de duas zonas: uma zona de praia de resíduos acima da água e numa zona de lama associada à água de decantação da lagoa (Vick, 1990).

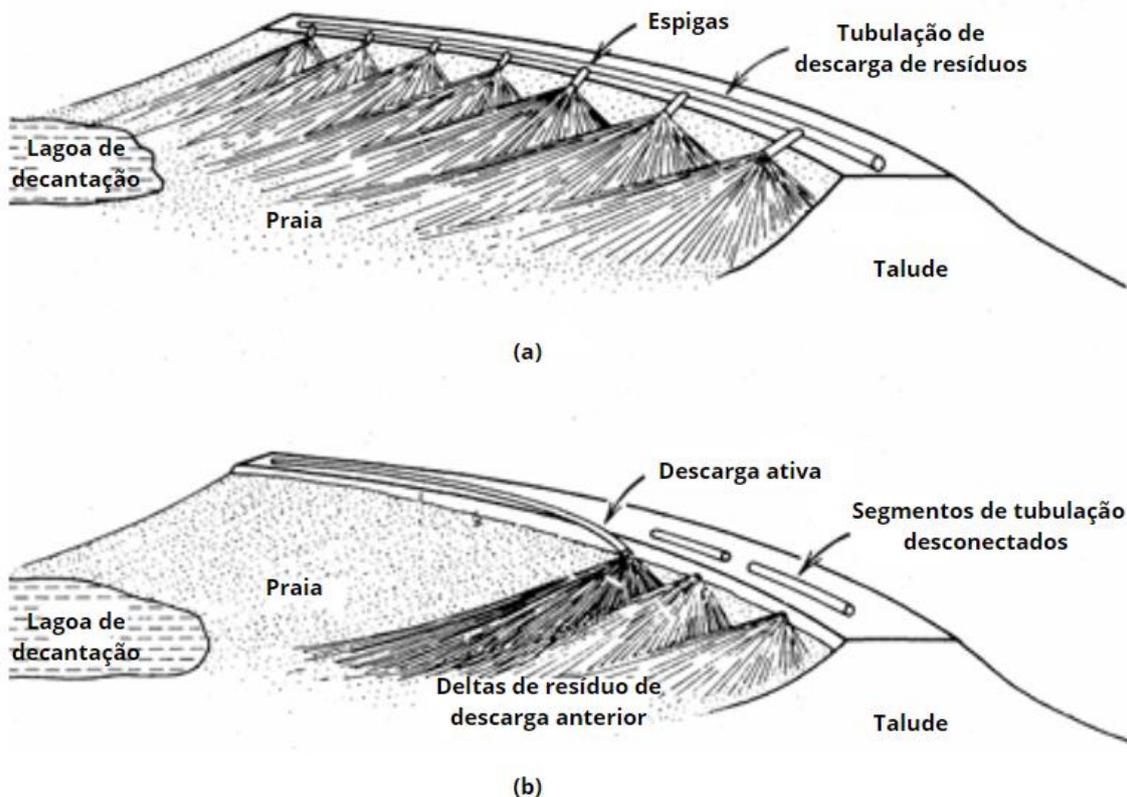


Figura 2. 4: Métodos de descarga periférica. (a) Espigão. (b) Descarga pontual.  
Fonte: Vick (1990)

Na zona de praia geralmente consta resíduo de granulometria mais grosseira e de maior densidade. Vick (1990) explana que a separação hidráulica do material resulta

numa tendência geral de partículas mais grossas e mais densas serem depositadas próximo dos pontos de lançamento, e de partículas mais finas e menos densas serem transportadas e depositadas mais longe do ponto de descarga. Souza (2018) explica que essa separação hidráulica está relacionada à relação entre a energia de lançamento (velocidade) e o peso das partículas, pois à medida que ocorre a dissipação da energia, as partículas mais pesadas sedimentam, deixando as mais leves em suspensão, que decantam a distâncias maiores e em fluxos menos turbulentos.

Devido a essa separação hidráulica ocorre a formação de três zonas de diferentes permeabilidades ao longo do perfil da barragem de resíduo (Figura 2.5 (a)): uma de alta permeabilidade, formada pelos resíduos granulares (mais grosso), próxima ao ponto de descarga, uma de baixa permeabilidade (mais fino) situada distante deste ponto e uma intermediária entre estes dois pontos (Souza, 2018; Vick, 1990). Contudo, pode ocorrer caso em que partículas finas e mais densas (partículas de hematita) fiquem depositados próximo ao ponto de lançamento devido ao seu elevado peso (Figura 2.5 (b)). Em situações assim segundo Souza (2018), a deposição de partículas menores, entretanto, de maior densidade ocorre na zona próximo ao ponto de lançamento, enquanto as partículas de maior tamanho contudo menos densas ocorrem na zona intermediária. As partículas menores e menos densas continuam a se depositar nas proximidades do lago.

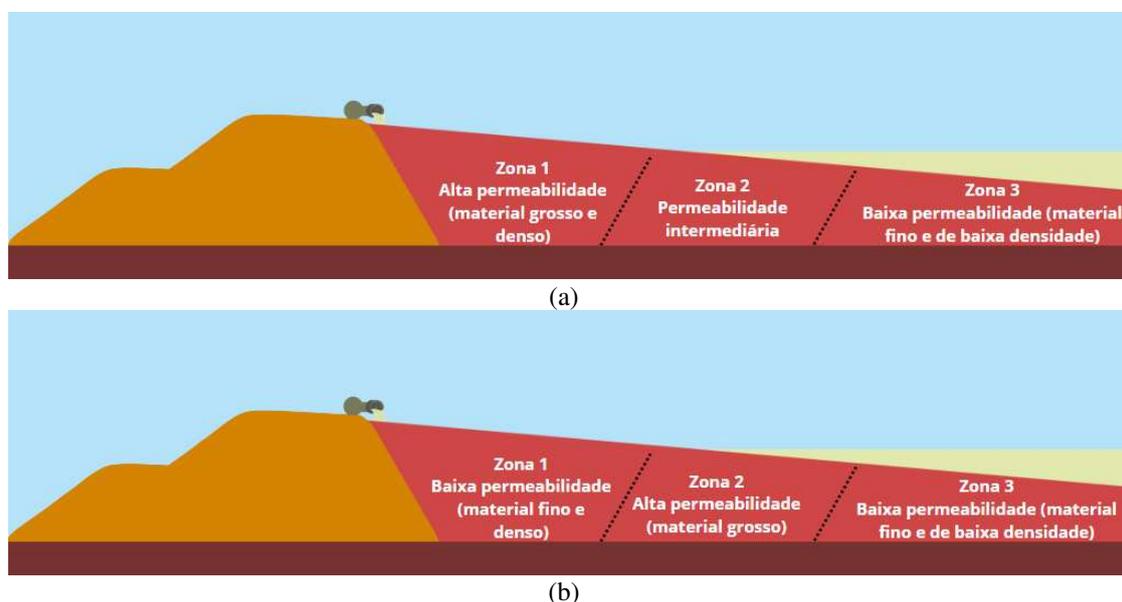


Figura 2. 5: Separação hidráulica em zonas.  
Fonte: Adaptado de Souza (2018)

Os resíduos arenosos grosseiros apresentam coeficiente de permeabilidade na faixa de  $10^{-4}$ m/s, enquanto os resíduos mais finos (lamas bem consolidadas de alta plasticidade) apresentam coeficiente de permeabilidade na faixa de  $10^{-10}$ m/s (Vick, 1983; Nierwinski, 2019; Bruschi, 2020). O coeficiente de permeabilidade diminui

gradativamente à medida que aumenta do teor de finos, plasticidade e profundidade do depósito. Na Tabela 2.4 encontra-se exposta a variação da permeabilidade em função das características do resíduo.

Tabela 2. 4: Coeficiente de permeabilidade dos resíduos de mineração

Característica do resíduo	Coeficiente de permeabilidade (k)(m/s)
Arenoso grosso, limpo, menos de 15% de finos	$10^{-4}$ a $10^{-5}$
Arenoso próximo dos pontos de despejo, mais de 30% de finos	$10^{-5}$ a $5 \times 10^{-6}$
Baixa plasticidade ou não plástico	$10^{-7}$ a $5 \times 10^{-9}$
Alta plasticidade	$10^{-6}$ a $10^{-10}$

Fonte: Adaptado de Nierwinski, (2019)

Outras duas propriedades físicas que aparecem com alta variabilidade é o peso específico aparente seco e a umidade ótima. Dependem diretamente da origem do resíduo, composição, e energia de compactação. Em suma, o resíduo de bauxita pode apresentar propriedades físicas variadas dependendo da jazida do mineral de origem, do método industrial utilizado no processo de extração de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e do processo de deposição. E essa variabilidade tem impacto direto no comportamento hidráulico-mecânico, na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento.

#### 2.2.4 Resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita

Na mecânica dos solos, a resistência ao cisalhamento é a máxima resistência interna por área específica que o material pode suportar sem sofrer rupturas. O cisalhamento se dá devido ao deslizamento entre partículas do material. Os principais fenômenos que permitem menor ou maior deslizamento são o atrito e a coesão (Lambe e Withman, 1969; Bedin, 2010; Nierwinski, 2019).

O resíduo de bauxita geralmente apresenta uma elevada resistência ao cisalhamento, consequência do elevado ângulo de atrito geralmente exibido por esse material. Esse elevado ângulo de atrito é percebido inclusive na lama vermelha, assim como exposto na Tabela 2.5. A lama vermelha, apesar da granulometria fina (silte e argila), apresenta geralmente um ângulo de atrito acima de  $30^\circ$ , e um intercepto coesivo praticamente nulo. Com isto, percebe-se que o resíduo não se comporta exatamente como solo. Schnaid *et al.* (2014) traz em suas análises parâmetros geotécnicos como a resistência ao cisalhamento drenado destacando que a resistência do resíduo é geralmente maior do que para solos naturais semelhantes.

O resíduo por ser resultante do processo industrial, apresenta partículas angulares e rugosas, assim como ilustrado na Figura 2.6. A elevada angularidade das partículas tem impacto direto no ângulo de atrito interno do resíduo o que reflete na alta resistência ao cisalhamento (Vick, 1983; Schnaid *et al.*, 2014; Nierwinski, 2019). Para uma mesma

densidade e mesmo nível de tensões, os resíduos de mineração costumam apresentar ângulos de atrito efetivos da ordem de 3 a 5 graus a mais que os solos naturais (Nierwinski, 2019).

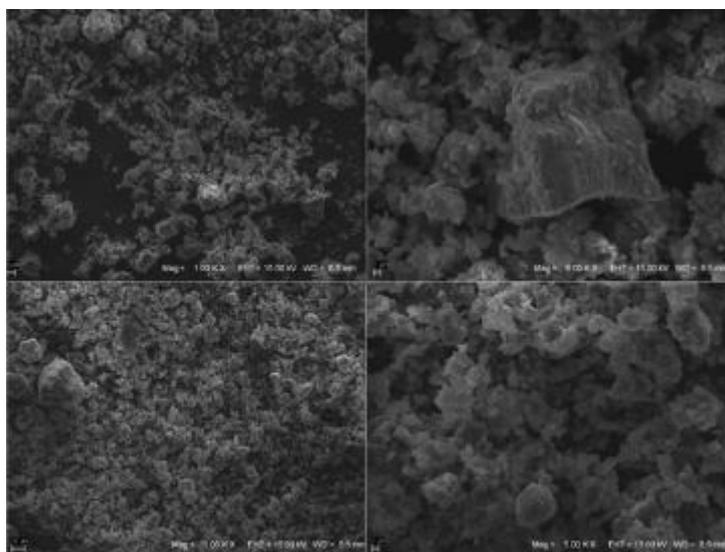


Figura 2. 6: MEV de amostra de resíduo de bauxita.

Fonte: Gonçalves (2021)

Vick (1983) e Nierwinski (2019) destacam que o aumento da densidade e do índice de vazios pouco afeta o ângulo de atrito. Ou seja, é comum encontrar altos valores de ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento mesmo em resíduos depositados com elevado índice de vazios.

Tabela 2. 5: Parâmetro de resistência para resíduos de bauxita de diferentes fábricas no redor do mundo

País	Processo de extração	Tipo de resíduo de bauxita	Parâmetros de resistência		Autor
			$\Phi'$	$c'$	
China	Bayer	Areia vermelha	37,13	0,28 kPa	Ding et al, (2021)
China	Bayer	Areia vermelha	38,27°	0,26 kPa	Xu et al, (2019)
UK	Bayer	Lama vermelha	42°	10-20kPa	Newson <i>et al.</i> (2006)
Brasil	Bayer	Lama vermelha	40,54°	0	Bedin (2006)
Brasil	Bayer	Lama vermelha	36°	0	Bedin (2010)
Brasil	Bayer	Areia vermelha	32°	0	Bedin (2010)
Brasil	Bayer	Lama vermelha	36°	0	Schnaid <i>et al.</i> (2014)
Brasil	Bayer	Lama vermelha	32,4°	----	Nierwinski (2019)
Brasil	Bayer	Lama vermelha	32,6°	0	Gonçalves (2021)
Índia	Bayer	Lama vermelha	34,38°	28,8 kPa	Rout <i>et al.</i> (2013)
Espanha	----	Lama vermelha	38°	79,15 kPa	Rubinos <i>et al.</i> (2015)
Guiné	Bayer	Lama vermelha	33,5°	11,72 kPa	Gore (2015)
Guiné	Bayer	Lama vermelha	39,4°	9,65 kPa	Gore (2015)

Fonte: Autor (2024)

Geralmente os materiais siltosos e argilosos apresentam intercepto coesivo mais elevado. Contudo, se tratando de resíduo de mineração, esse valor tem se mostrado praticamente nulo na maioria dos casos. Segundo Nierwinski (2019) os resíduos de mineração geralmente são materiais não coesivos e tendem a apresentar intercepto

coesivo igual a zero em ensaios de laboratório devidamente executados e interpretados. Isso pode ser justificado pelo fato de que os resíduos de mineração são materiais resultante de processos industriais, não são submetidos aos processos físico-químicos que os solos geralmente passam no processo de formação lento. Segundo Newson et al (2006), o resíduo apresenta comportamento de compressão semelhante aos solos argilosos e comportamento de fricção semelhante aos solos arenosos.

### 2.3 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO

Segundo Duarte (2008), a deposição do resíduo de mineração pode se dar através do transporte na forma de granel, por meio de caminhões ou correias transportadoras, ou na forma de polpa (mistura de água e sólidos), por meio de tubulações com a utilização de sistemas de bombeamento ou por gravidade. O resíduo de mineração pode ser disposto em diferentes teores de sólidos e consistência. De acordo com Souza (2018), dependendo da consistência o resíduo pode ser classificado como:

- Resíduo em polpa (*slurry*): resíduo de mineração contendo baixo teor de sólidos (30% a 40%) e que apresente baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento. Esta concentração é a mais comum na saída dos resíduos de mineração de usinas de beneficiamento no Brasil;
- Resíduo espessado (*thickened tailings*): resíduo de mineração parcialmente desaguado e que apresenta consistência semelhante à polpa, sendo possível o transporte por bombeamento. Apresenta uma concentração de sólidos aumentada (45% a 65%) devido aos processos mecânicos de espessamento que é submetido;
- Resíduo em pasta (*paste tailings*): resíduo de mineração gerado pela incorporação de polímeros ou outros agentes espessantes à mistura de resíduos e água. Nessa consistência, o resíduo atinge uma concentração de sólidos que varia de 65% a 70%, caracterizando-se por não fluir naturalmente e por não drenar grandes volumes de água ao ser disposto no depósito final;
- Resíduo em torta (*cake tailings*): resíduo de mineração com aspecto de uma massa não saturada não bombeável e como alta concentração de sólidos (cerca de 80% a 85%). Essa consistência é resultado do processo de filtragem.

Na Tabela 2.6. encontram-se explanadas as principais características provenientes da disposição dos resíduos nas diferentes concentrações.

Tabela 2. 6: Principais características da disposição dos resíduos nas concentrações de polpa, espessados, pasta e torta

	Polpa	Espessado	Pasta	Torta
Processos de desaguamento <sup>1</sup>	Nenhum (ciclones podem ser utilizados)	Coagulantes / Floculantes / Ciclones / Espessadores / Modificadores químicos	Espessadores do tipo “ <i>Deep bed</i> ” aditivos químicos	Filtros (vácuo ou pressão)
Teor de sólidos gravimétricos (Cw) <sup>2</sup>	30-40%	45-65%	65-70%	80-85% (não saturado)
Transporte típico	Bombas centrífugas	Bombas centrífugas	Bombas de deslocamento positivo / e utilização de redutores de viscosidade	Caminhões ou esteiras
Volume de água para manejo	Finos dispostos no reservatório com volume significativo de água a ser manejada	Volume de água considerável a ser manejado	Pequeno ou nenhum volume de água a ser manejado	Ocorre apenas consolidação – água percolada pode ser negligenciada
Características dos resíduos depositados	Segregáveis	Possivelmente segregáveis	Não segregáveis	Aspecto de solo (não segregáveis)
Modelo de resistência aplicável	Reologia	Reologia	Transição	Mecânica dos Solos
Ângulos de praia	Suave com concavidade 0,5% - 2% (Vick, 1990)	Concavidade menor, levemente mais íngreme que o método convencional. Praia forma fluxo em canais 2% – 6% (CIGB/ICOLD; UNEP/PNUE, 2001)	“ <i>Sheet Flow</i> ”, com possibilidade de ocorrência de canalização. Formação de praia pode ser inibida pela resistência. 2% – 10% (Therault; Frostiak; Welch, 2003)	Não aplicável
Deformações pós deposição	Adensamento a grandes deformações	Adensamento a grandes deformações	Próximo de modelos tradicionais da mecânica dos solos	Modelos tradicionais da mecânica dos solos
Retenção dos resíduos	Estruturas de retenção para todos os métodos de disposição subárea	Podem ser autossustentados em ângulos de deposição muito baixos. Estruturas de retenção são ainda necessárias	Podem ser autossustentáveis em ângulos modestos, têm potencial para disposição com estruturas de disposição mínimas	Autossustentáveis em altos ângulos de deposição, dispensam estruturas de retenção.

1 – Centrífugas não listadas, podem desenvolver concentração intermediária entre pasta e torta

2 – Densidades típicas para minerais de resíduos de mineração de metais. Variação no comportamento para outros tipos de materiais minerados pode ser esperada.

Fonte: Davies (2011)

## 2.4 ARMAZENAMENTO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO

O armazenamento de resíduos de mineração pode ser feito em pilhas, por empilhamento a seco, em barragens de contenção, em cavas, ou em vazios de mineração subterrânea usando o material como aterro. A seleção do método de armazenamento do ponto de vista da IBRAM (2016), depende da natureza do processo de mineração, das condições geológicas e topográficas da região, das propriedades mecânicas dos materiais, do poder de impacto ambiental de contaminantes dos resíduos, e das condições climáticas da região. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha depende das condições locais, do volume de resíduos gerados e da prioridade em termos de segurança e custo.

### 2.4.1 Armazenamento em barragem de contenção

O método consiste na construção de aterros compactados, que tem como função principal a contenção de resíduos sólidos e água oriundos do processo de beneficiamento dos minérios (Silva, 2021). Nessa metodologia, o material é bombeado na forma de polpa para o interior das barragens impermeabilizadas para evitar a infiltração nas águas subterrâneas. Com o tempo, a parte sólida consolida por gravidade e o licor associado ao resíduo é coletado e retornado para a refinaria. Passado algum período, com a barragem preenchida se dá início ao processo de reabilitação (IAI, 2022).

É o método mais usado no Brasil até então, e segundo Duarte (2008), essas barragens podem ser construídas utilizando-se solos, estéreis (materiais removidos durante a extração do minério) ou mesmo o próprio resíduo. A construção da barragem pode ser executada em uma etapa única ou em várias etapas (alteamentos). De acordo com Portes (2013), a construção em várias etapas por meio de alteamentos sucessivos é normalmente vista como o mais atraente, dado que dessa forma elimina-se várias desvantagens como a obrigatoriedade de área de empréstimo, disponibilidade de área, elevado investimento inicial, entre outros. O alteamento pode ser feito de três formas: por montante, por jusante ou pela linha de centro. A denominação faz referência ao deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante as etapas de alteamento em relação ao dique de partida.

#### a) Método de alteamento à montante

O método de montante consiste na execução de alteamentos subsequentes deslocando o eixo da barragem para montante do dique de partida até atingir a cota de projeto, fazendo com que os diques de contenção se apoiem sobre o próprio resíduo depositado. Nierwinski (2019) destaca que na maioria dos casos durante o processo de deposição dos resíduos, a fração grosseira separada hidráulica compõe a zona denominada de praias de resíduo (próximas

aos pontos de lançamento) e a fração mais fina compõe as lagoas de resíduos, conforme ilustrado na Figura 2.7.



Figura 2. 7: Alateamento por montante.

Fonte: IBRAM (2016)

Nierwinski (2016), enfatiza que o método de montante é o método de disposição mais antigo e que foi visto por um bom período como o mais econômico e de maior facilidade de execução. E é justamente por isso que esse método foi amplamente utilizado pelas mineradoras no Brasil e no mundo. No entanto, é importante salientar que o método de montante está associado à maioria dos casos de ruptura de barragens de resíduos por todo o mundo. O baixo nível de segurança apresentado por esse método está ligado ao fato de os alateamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados, ou seja, os diques de contenção se apoiam sobre o próprio resíduo depositado. O material por estar sob condição saturada e estado de compactação fofo, tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação (resíduos granulares) por carregamentos dinâmicos e/ou estáticos que podem comprometer a segurança da estrutura (CONSOLI *et al.*, 2022).

Segundo IBRAM (2016), neste método construtivo existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível de água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura. Nierwinski (2019) cita as principais causas de rupturas associadas ao método construtivo por montante:

- Liquefação: as barragens alteadas a montante são particularmente suscetíveis à liquefação, uma vez que, os resíduos de mineração depositados neste sistema, geralmente, apresentam baixa densidade e altos níveis de saturação. Esta combinação pode resultar em liquefação desencadeada tanto por terremotos, como detonações em minas próximas ou até movimentação de equipamentos pesados nas proximidades. A ruptura por liquefação pode ocorrer em barragens de pouca altura e com diques pouco inclinados, portanto, não se aconselha o uso de barragens alteadas à montante em regiões de alta sismicidade;

- Altas taxas de alteamento: caso uma barragem à montante seja alteada de forma muito rápida, poropressões muito altas podem ser produzidas no interior dos resíduos. Estas altas poropressões reduzem a estabilidade da barragem e podem causar rupturas. Recomenda-se uma taxa segura de alteamento entre 4,5 e 9 metros por ano;
- Ruptura da fundação: caso a base da barragem não apresente capacidade de suporte adequada, movimentos ao longo de planos de ruptura ocorrerão. No caso de barragens alteadas à montante, os alteamentos são realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados, que nem sempre fornecem uma boa capacidade de suporte;
- Níveis de água excessivos: a ruptura de uma barragem pode ocorrer se a superfície freática atingir níveis críticos, ou seja, quando a largura da praia de resíduos, entre a lagoa e a crista da barragem, se tornar muito pequena. Nas barragens alteadas a montante existe dificuldade na implantação de um eficiente sistema interno de drenagem que permita o controle da superfície freática, sendo que, inundações, alta pluviosidade, rápido derretimento de neve e gestão inadequada por parte do operador podem causar níveis excessivos de água no interior da barragem, levando-a ao colapso. Caso a água escoe sobre a crista da barragem podem ocorrer fissuras, erosão e até o completo colapso da estrutura;
- Altas taxas de infiltração: infiltração no interior ou abaixo da barragem provoca erosão ao longo dos canais de fluxo. Quando em excesso podem provocar a ruptura da barragem.

Devido ao rompimento da barragem da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, em janeiro de 2019, que resultou na perda de 259 vidas e 11 pessoas desaparecidas, foi estabelecida no Brasil a Lei 14.066, de 2020. Essa legislação proíbe a construção de barragens alteadas por montante, e todas as barragens já construídas nesse formato devem ser desativadas e passar pelo processo de descomissionamento.

#### **b) Método de alteamento à jusante**

O método de jusante é um método que surgiu com o intuito de diminuir os riscos associados ao método de montante. Segundo Silva (2021), esse método consiste na execução de alteamentos subsequentes deslocando o eixo da barragem para jusante do dique de partida até atingir a cota de projeto. Assim como pode ser visto na Figura 2.8, diferente do método anterior, cada alteamento executado nessa metodologia é estruturalmente independente da disposição do resíduo, o que melhora a estabilidade e segurança da estrutura.

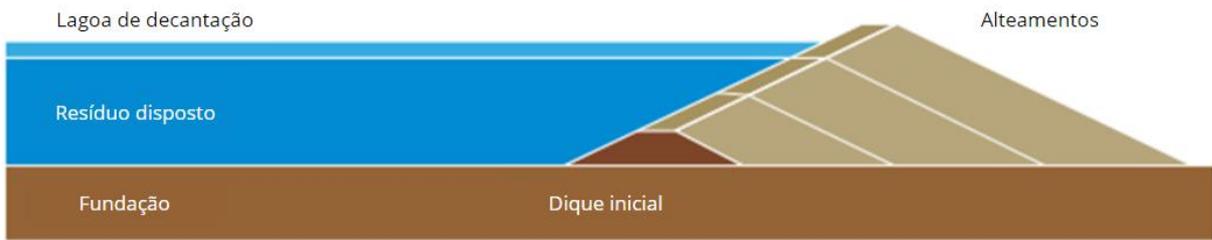


Figura 2. 8: Alateamento por jusante  
Fonte: IBRAM (2016)

No método de alateamento à jusante, os diques adicionais são construídos com o lançamento dos aterros sobre os taludes de jusantes. Dessa forma é possível tanto o controle do lançamento e da compactação do material, como o controle da linha de saturação na estrutura da barragem, uma vez que permite a instalação de sistemas de drenagem interna durante a construção da barragem e o prolongamento do mesmo durante os processos de alateamento (Duarte, 2008). Nessas circunstâncias pode-se dizer que esse método é o que garante maior estabilidade e segurança em relação aos outros três. Em contrapartida, esse método acaba sendo o menos econômico, pois segundo Vick (1983), as barragens alteadas pelo método de jusante demandam maiores volumes de material para construção e ocupam uma área muito maior devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura.

### c) Método de alateamento pela linha de centro

O método de montante proporciona um baixo nível de segurança e estabilidade. O método de jusante por sua vez, garante a estabilidade e segurança, mas implica maior custo. Nesse cenário, de acordo com Gonçalves (2021) surgiu o método de linha de centro como alternativa intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, minimizando suas desvantagens e apresentando vantagens como a facilidade construtiva, a economia de espaços físicos e os custos compatíveis. Esse método consiste na execução de alateamentos subsequentes mantendo eixo da barragem coincidente com o eixo do dique de partida até atingir a cota de projeto (Vick, 1983). Dessa forma, o dique de alateamento apoia-se à montante sobre a praia de resíduos e à jusante sobre o dique da etapa anterior, conforme destacado pela Figura 2.9.

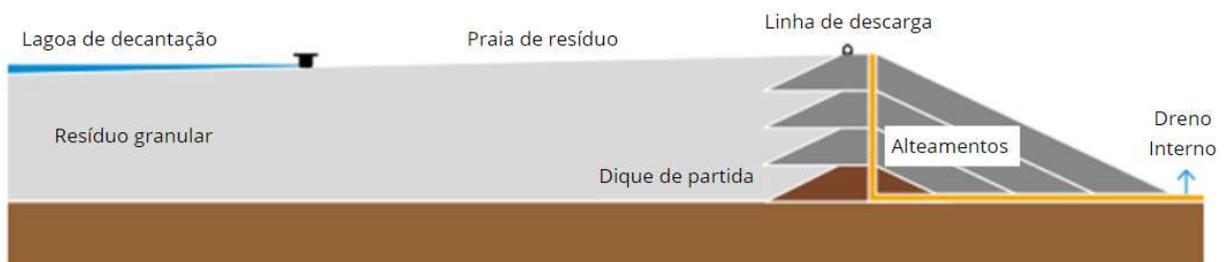


Figura 2. 9: Alateamento pela linha de centro  
Fonte: IBRAM (2016)

Segundo Duarte (2008), o método de linha de centro apresenta um comportamento geotécnico que assemelha mais a barragens alteadas para jusante, sendo até mesmo considerado uma variação deste método. É possível com esse método utilizar zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, possibilitando assim o controle da linha de saturação e garantindo a dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade.

#### **2.4.2 Armazenamento por empilhamento drenado**

Segundo IBRAM (2016), esse método consiste na deposição do resíduo de mineração em camadas sucessivas, formando um depósito de material solto. O líquido presente na mistura é drenado por meio de canais drenagem interna, de grande capacidade de vazão instaladas na base do depósito, de forma a possibilitar a saída de água livre dos poros da pilha de resíduo de mineração e minimizar os riscos ambientais associados ao material (IBRAM, 2016). Esse método mostra ser adequado somente para resíduo de mineração que apresentem coeficiente de permeabilidade que permita um fluxo de drenagem estritamente gravitacional e subvertical no interior do aterro. Sendo assim, é considerado inapropriado o uso desse método para resíduos finos (Alves, 2020). Na Figura 2.10 encontra-se um exemplo do método de empilhamento drenado.



Figura 2. 10: Empilhamento drenado

Fonte: IBRAM (2016)

De acordo com Daronco (2022), primeiramente é construído um dique de partida e o sistema de drenagem interna, que são drenos executados na fundação do reservatório. Em seguida é feita a deposição dos resíduos (resíduos com granulometria predominantemente arenosa). Após o enchimento, são construídos alteamentos sucessivos, por montante, com

resíduos retirados da própria praia e compactados com tratores de esteira. Portes (2013), destaca que, os principais objetivos deste método são:

- Obter um maciço não saturado e estável;
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil;
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Obter maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicação segura do método de montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.

### **2.4.3 Armazenamento por empilhamento a seco (método *dry stacking*)**

O método de armazenamento por empilhamento a seco ou *dry stacking*, diferente do método convencional (armazenamento em barragens de contenção), e apresenta menor riscos estrutural e ambiental. Segundo IBRAM (2016), esse método consiste na utilização de filtros, que permitem a drenagem da parte líquida dos resíduos. É importante salientar que diferente do método citado no item 2.4.2, a água é removida do resíduo antes da deposição, o que resulta em um depósito mais estável e menos sujeito a deslizamentos e colapsos.

Essa técnica vem sendo amplamente adotada entre as indústrias de mineração no Brasil, como alternativa sustentável e de substituição do método de armazenamento convencional. Do ponto de vista de Crystal *et al.* (2018), a disposição por empilhamento a seco é uma alternativa viável para o gerenciamento de resíduos, no entanto, preocupações quanto à eficiência do filtro, custos operacionais e seus rendimentos são desmotivantes quanto à sua implantação, em comparação com um represamento convencional.

Segundo Daronco (2022), no processo de filtragem, é necessário que exista a presença de uma força sobre as partículas de resíduo, que pode ser a força da gravidade, vácuo, pressão ou até centrifugação. Após a filtragem, os resíduos são dispostos na forma de *dry stacking*. Nessa técnica de armazenamento, os resíduos filtrados são transportados e lançados em pilhas, onde são compactados segundo critérios geotécnicos pré-estabelecidos. Este método de armazenamento basicamente consiste em uma operação de terraplenagem, no entanto existe a possibilidade de efetuar a compactação apenas de uma zona onde a superfície é crítica, assim como exibido na Figura 2.11. Isto reduz os gastos operacionais e garante a estabilidade do empilhamento (Daronco, 2022; Davis, 2011). Tipicamente, o sistema de armazenamento de resíduo em pilhas secas apresenta dois setores: o primeiro onde o resíduo filtrado é compactado em camadas, e o segundo onde o material não é submetido ao processo de compactação. O setor compactado funciona como um dique para conter o resíduo filtrado não compactado (Lupo e Hall, 2010; Crystal *et al.* 2018; Chaves 2013).

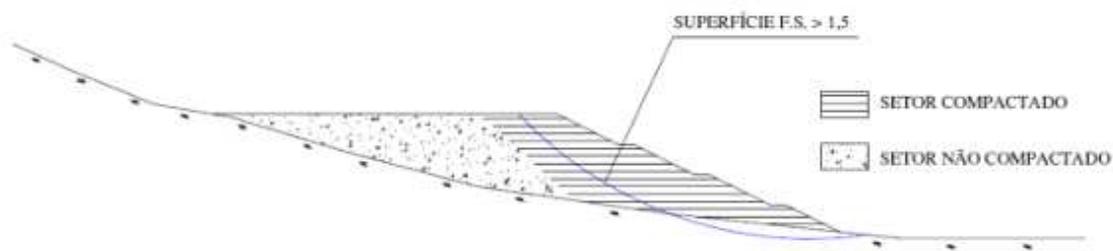


Figura 2. 11: Faixa de compactação do *dry stacking*  
 Fonte: Daronco (2022)

Esse sistema de armazenamento por ser mais eficiente em termos de uso de água e menos propenso a vazamentos ou contaminação, se torna numa alternativa mais atraente quando comparado aos métodos de armazenamento convencional em lagos de resíduo de mineração (Chaves, 2023;). Na Figura 2.12 encontra-se ilustrado o sistema completo de *Dry Stack Tailings*.

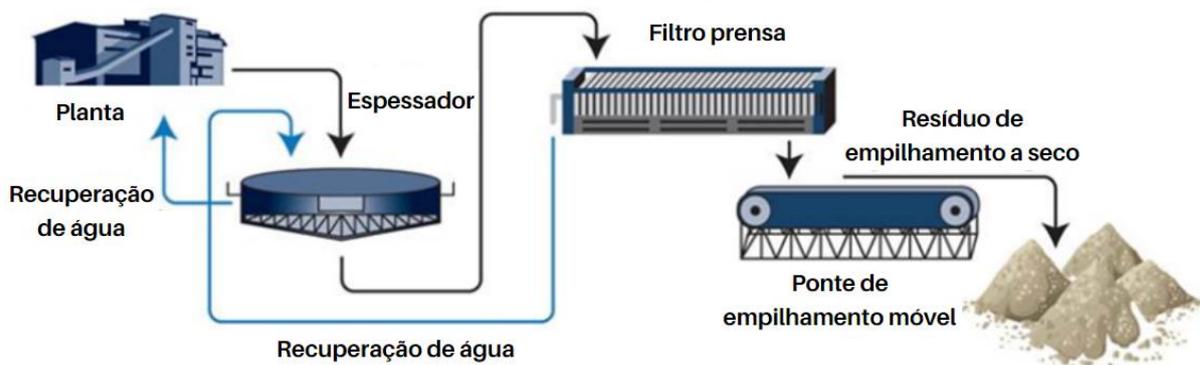


Figura 2. 12: Sistema completo de *Dry Stack Tailings*  
 Fonte: Adaptado de TAKRAF (2016)

De acordo com Daronco (2022), diversos fatores podem influenciar na taxa de filtração como as características geotécnicas dos sólidos, os aspectos da polpa e o tipo de equipamento utilizado. Williams *et al.* (2017) afirmam que a composição mineralógica e a granulometria do resíduo são os primeiros requisitos a serem analisados ao se cogitar a opção de disposição de resíduo filtrado. Assim sendo, além dos custos associados ao emprego dessa nova tecnologia, é importante que seja compreendido que cada resíduo irá apresentar comportamento único durante o processo de filtração, dificultando assim a elaboração de um modelo amplo. Contudo, é importante que o material esteja com um teor de umidade ótimo e seja compactado com o peso específico desejado de acordo com o projeto, para que se mantenha a estabilidade da pilha.

As pilhas de resíduo apresentam geometrias distintas em função da topografia do local de construção. Na Figura 2.13 encontra-se exposto as geometrias de pilhas para diferentes condições topográficas.

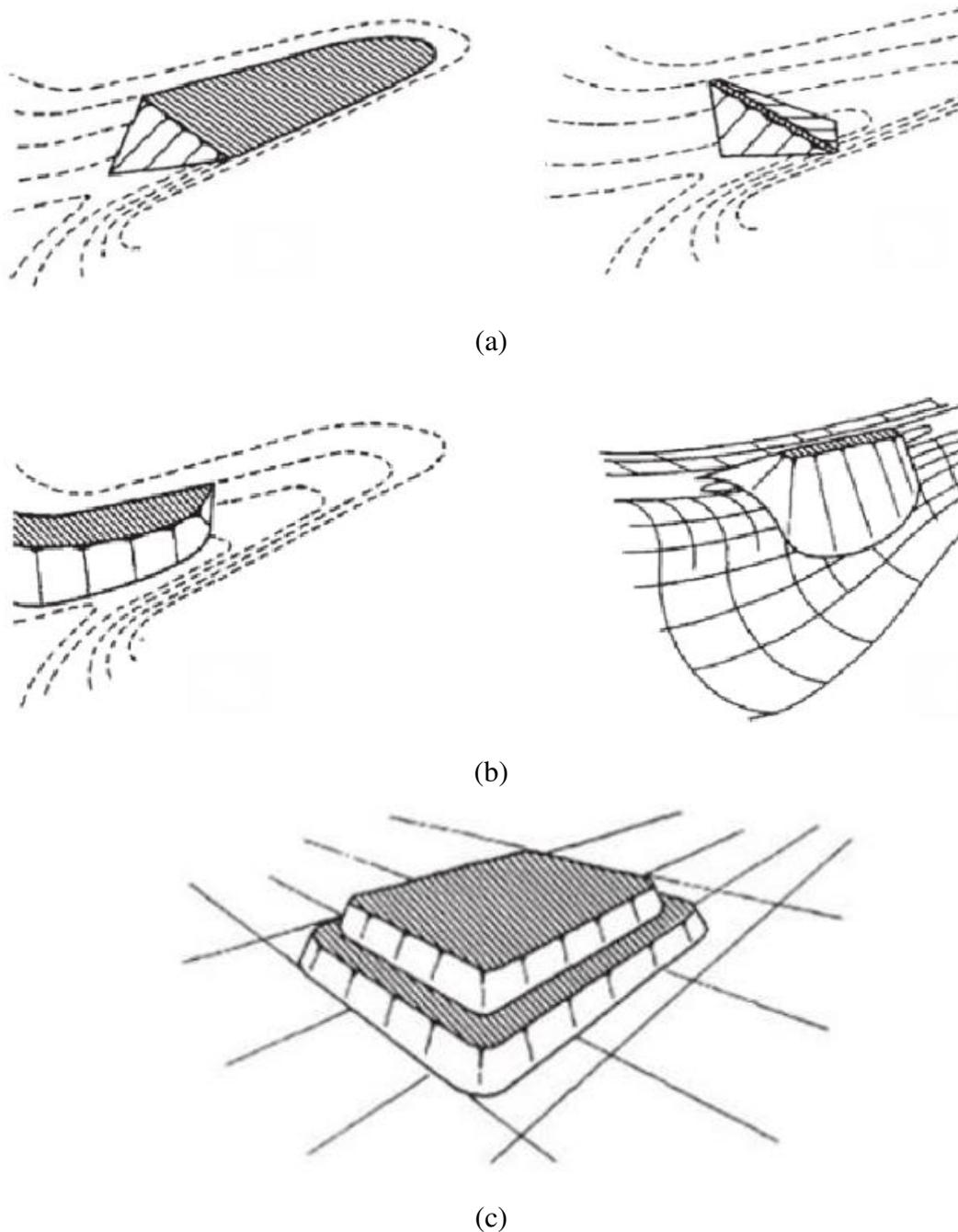


Figura 2. 13: Geometria das pilhas: (a) em vale; (b) em encosta; (c) em formato de pirâmide  
Fonte: Chaves (2023)

## 2.5 MELHORAMENTO DE GEOMATERIAIS

Nas obras de engenharia nem sempre os materiais disponíveis ou envolvidos apresentam propriedades exigidas para a execução dos projetos. Em alguns caso os solos tendem a não apresentar os requisitos específicos de engenharia, uma vez que são materiais heterogêneos e

complexos, tanto na direção horizontal quanto na vertical, e apresentam uma variabilidade dependendo da região.

Em cenários como esses Ingles e Metcalf (1972) destacam três alternativas distintas que podem ser adotadas visando a implementação do projeto: substituição da camada de solo inadequada por material com melhores propriedades; adequação do projeto às propriedades solo local; aplicação de técnicas de melhoramento que visam alterar as propriedades dos solos com o intuito de fazê-los atender a requisitos específicos de engenharia. Do ponto de vista de Chaves (2022), a terceira opção mostra ser a mais viável economicamente, dado que a substituição da camada de solo inadequado é realizada facilmente até profundidades de três a quatro metros, além disso podem ser gerados custos adicionais com operações de empréstimos. Consoli *et al.* (2007) acrescenta salientando que adaptar o projeto às características do material, pode gerar gastos incompatíveis ao orçamento previstos para a construção do empreendimento, pois a solução tomada geralmente inclui o uso de fundações profundas.

A técnica de melhoramento de solos fundamenta-se no tratamento dos solos, seja por um processo mecânico, físico ou químico, tornando-os estáveis para os limites de sua utilização, e mantendo-os assim, mesmo sob ação de cargas externas e condições meteorológicas. Expressões como solo melhorado, solo modificado, solo estabilizado, solo tratado são usados para fazer referência ao solo que foi submetido a essa técnica. Segundo Mafessoli (2022), a adoção de uma ou outra intitulação refere-se ao grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de agente cimentante aplicado. Essas expressões, no presente trabalho serão consideradas sinônimos e ao longo do texto será adotado o termo solo melhorado para fazer referência a técnica.

A técnicas de melhoramento de solos vêm sendo aperfeiçoadas há décadas, por vários autores (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001; Consoli, Vendruscolo e Prietto, 2003; Rotta *et al.*, 2003; Foppa, 2005; Consoli, Rotta, Prietto, 2006; Consoli *et al.*, 2007a, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2017; Gill e Singh, 2011; Scheuermann Filho e Cosoli, 2023; entre outros) justamente por possibilitar o uso de solo local evitando deslocamento de solo e criação de bota fora. Quando se fala da aplicação da técnica de melhoramento de solos, é imperativo o não menosprezo dos carregamentos e das condições meteorológicas que o solo como material de construção possa ser submetido ao longo da vida útil da obra (Mafessoli, 2022; Ingles e Metcalf, 1972; Lambe e Whitman, 1969; Murthy, 2002). Geralmente, as características mais buscadas quando se utiliza o melhoramento de solos são o aumento da resistência, a diminuição da compressibilidade,

melhoria da trabalhabilidade, redução da variação volumétrica e a redução da permeabilidade do material (Daronco, 2022; Mafessoli, 2022).

Nos últimos anos vários autores como (Alam *et al.*, 2019; Bruschi *et al.*, 2021; Consoli *et al.*, 2022, Chaves *et al.*, 2023; Consoli *et al.*, 2022, 2023; Farenzena *et al.*, 2024; entre outros) têm explorado possibilidades de aplicação dessas técnicas de estabilização em resíduos de mineração, com o intuito de viabilizar a proposta de utilização do resíduo como materiais de construção. Nesse cenário, a estabilização química tem mostrado ser uma proposta interessante, principalmente com o uso de aditivos tradicionais como cal, cinza volante e cimento (Consoli *et al.*, 2022). O processo de melhoramento de resíduo de mineração com cimento envolve a mistura do cimento com os resíduos de mineração, resultando na formação de um material sólido e resistente. Uma das principais vantagens da aplicação do cimento no melhoramento do resíduo de mineração é o melhoramento da trabalhabilidade do material e a mitigação da formação de poeiras. Acima de tudo, essa técnica contribui para a estabilidade e segurança das estruturas construídas, uma vez que o material resultante é resistente e estável. Dessa forma essa prática acaba tendo um efeito direto na redução do impacto ambiental causado pelos resíduos gerados durante a atividade de mineração. Contudo, é essencial ter cuidado na aplicação da técnica de estabilização em resíduos de mineração, uma vez que esses resíduos podem conter substâncias tóxicas e perigosas para a saúde humana e para o meio ambiente (Muniz e Oliveira Filho, 2006; Mechi e Sanches, 2010; Freitas *et al.*, 2019).

### **2.5.1 Técnica Solo-Cimento**

O melhoramento de solo com cimento, também conhecida como técnica solo-cimento, é categorizada como estabilização química, pois por meio de reações químicas, promove melhorias nas propriedades mecânicas através da cimentação ou aglutinação das partículas do material. Em essência, essa técnica desempenha um papel crucial ao conferir coesão ao material. A sua aplicação confere características específicas ao material melhorado, capacitando-o a atender requisitos como durabilidade e resistência, tornando-o apto a suportar cargas externas ou resistir a fenômenos naturais.

O solo-cimento se distingue do concreto em diversos aspectos, sendo uma diferença fundamental o fato de que, no concreto, há uma quantidade de pasta (cimento + água) suficiente para envolver a superfície dos agregados e preencher os espaços vazios entre eles. Em contrapartida, nas misturas de solo-cimento, a quantidade de pasta é insuficiente para cobrir todas as partículas de solo e ocupar os espaços vazios, resultando em uma matriz cimentícia que une nódulos de agregados não-cimentados (Foppa, 2016).

A aplicação de cimento em qualquer tipo de solo é viável, sendo mais eficiente em solos arenosos devido à facilidade de mistura e às resistências superiores obtidas (Ingles & Metcalf, 1972). O termo "solo-cimento" refere-se ao produto endurecido proveniente da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água, em proporções definidas por dosagem (ABNT NBR 12253, 2012). A definição da *American Concrete Institute (ACI)* (2009) caracteriza solo-cimento como uma mistura densamente compactada de cimento Portland, solo e água, com proporções medidas. Ingles e Metclaf (1972) destacam que qualquer tipo de cimento pode ser usado na estabilização. Isso inclui os cimentos alternativos obtidos através da ativação alcalina, de misturas, formadas geralmente por subprodutos da indústria. Atualmente, diversos estudos têm explorado a aplicação de diferentes tipos de cimentos em questões geotécnicas, embora o cimento Portland permaneça o agente cimentante mais amplamente utilizado. Devido aos custos elevados, são frequentemente realizados estudos para determinar a quantidade mínima de cimento Portland necessária para atingir características específicas. Em alguns casos, estudos são necessários para estabelecer um limite máximo de cimento, a fim de evitar efeitos adversos, como trincamentos por retração (Ingles & Metcalf, 1972).

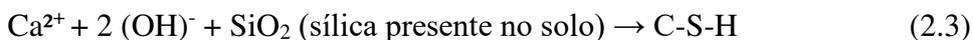
### 2.5.2 Química da estabilização solo-cimento

O cimento Portland comum normalmente apresenta na sua constituição aproximadamente 50-70% de silicato tricálcico ou alita ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), 15-30% de silicato dicálcico ou belita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), 5-10% de aluminato tricálcico ou celita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e 5-15% de ferro-aluminato tetracálcico ou ferrita ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). (Bergado *et al.*, 1996; Cristelo, 2001; Thomas, 2004; Mafessoli, 2022). Esses compostos ao interagirem com água, passam por um processo de hidratação (Equação 2.1), onde os silicatos de cálcio dão lugar à formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que se dissocia em água elevando o pH do meio e um processo de hidrólise (Equação 2.2).

Os C-S-H, assumem uma consistência gelatinosa e amorfa, que vai densificando ao longo do tempo, conforme o avanço das reações de hidratação. Esses compostos são os principais responsáveis pela resistência mecânica e durabilidade do solo estabilizado. O hidróxido de cálcio por sua vez, apresenta uma única fase de hidratação que tem composição química e estrutura cristalina bem definidas. A sua morfologia consiste basicamente em massivos cristais hexagonais (Chaves, 2023).



O cálcio, oriundo da hidrólise do hidróxido de cálcio, reage gradualmente com a sílica e a alumina presentes nos solos (Equação 2.3 e 2.4), formando produtos cimentantes adicionais, essas reações químicas são denominadas pozolânicas (Chaves, 2022).



### **2.5.3 Fatores que influenciam nas propriedades mecânicas do geomaterial melhorado**

Alguns fatores como proporção de cimento na mistura, as propriedades dos materiais constituintes, o teor de umidade, as condições de compactação e cura, tempo de cura, entre outros, influenciam positivamente ou negativamente no resultado do processo. Dessa forma se torna essencial entender de que forma esses fatores afetam o resultado do processo.

Do ponto de vista de Åhnberg (2006) a composição do solo influencia consideravelmente no resultado da estabilização, e a eficácia do agente cimentante para uma determinada aplicação irá variar com o tipo de solo. Åhnberg (2006) ainda afirma que, para entender os efeitos da adição de ligante é essencial entender as reações básicas que normalmente ocorrem no solo após a mistura com ligantes, pois o aumento da resistência com o tempo, tanto em perspectivas de curto quanto de longo prazo, pode em geral estar relacionado ao tipo e quantidade de vários produtos de reação que são gerados pelos processos químicos que ocorrem durante a estabilização.

#### *2.5.3.1 Efeito do teor do cimento*

Ingles e Metcalf (1972) citam, que as características apresentadas pelo geomaterial após adição do cimento dependem da quantidade desse ligante. Os autores destacam ainda que, a adições de até 2% geram ligeiras alterações, como o aumento do tamanho das partículas, a redução da capacidade de retenção de água e a redução no índice de plasticidade. No entanto, a adições acima de 2%, promovem um aumento da capacidade de carga, durabilidade, e reduzem a suscetibilidade à expansão, quando o material tratado é argiloso.

Diversos trabalhos mostram que a adição de cimento ao geomaterial aumenta a sua resistência mecânica e sua rigidez. Schnaid, Prietto e Consoli (2001), Rotta *et al.* (2003), Consoli *et al.* (2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2022, 2023) Scheuermann Filho e Consoli (2023) e outros autores mostram que o teor de cimento tem grande efeito na resistência à tração e compressão simples da areia-cimento. Com base nesses percebe-se que mesmo uma pequena adição de cimento é suficiente para gerar um ganho significativo de resistência. A Figura 2.14 exhibe o efeito do teor do cimento na resistência do geomaterial cimentado.

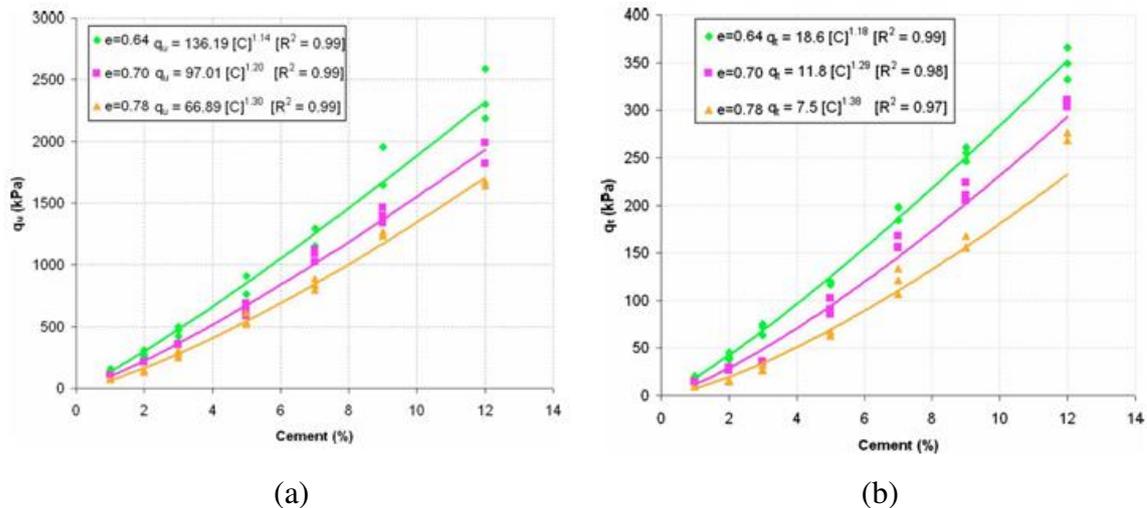


Figura 2. 14: Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (a) e tração (b) de solo arenoso.

Fonte: Consoli *et al.* (2010)

Com base em estudos desenvolvidos sobre um material silto-argilosos estabilizados com cimento, Horpibulsuk *et al.* (2010) estabeleceram três zonas do desenvolvimento de resistência de acordo com o teor de cimento adicionado (Figura 2.15):

- Zona ativa (0 a 11% de teor de cimento): ocorrem ganhos substanciais de resistência à medida que o teor de cimento aumentou devido à diminuição de poros menores que 0,1  $\mu\text{m}$  e ao incremento na formação de produtos cimentícios;
- Zona inerte (11 a 30% de teor de cimento): resulta em melhorias irrelevantes na resistência, acompanhadas por alterações insignificantes tanto no tamanho dos poros como na formação de produtos ligantes;
- Zona de deterioração (teor de cimento superior a 30%): o teor de água se torna insuficiente para a hidratação da quantidade de cimento adicionada, resultando em uma tendência inversa entre resistência e o teor de cimento.

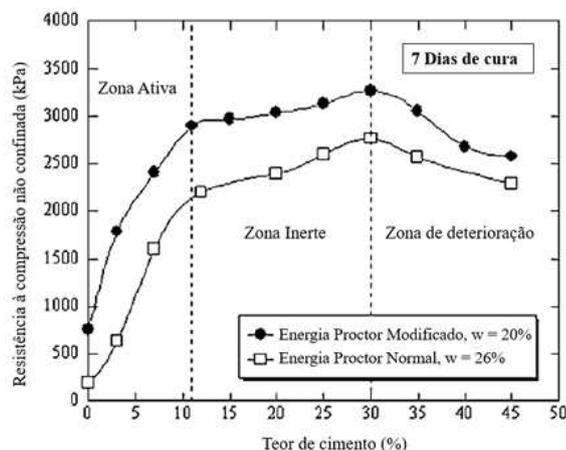


Figura 2. 15: Zonas de desenvolvimento de resistência em função do teor de cimento

Fonte: Horpibulsuk *et al.* (2010)

O cimento também tem mostrado ser eficiente no melhoramento de resíduo de mineração. Daronco (2021) em seus estudos analisou o comportamento geomecânico de resíduo ferro melhorado com cimento e constatou que o teor de cimento da mistura é diretamente proporcional ao aumento na resistência do material. Mafessoli (2022), Chaves *et al.* (2023), Consoli *et al.* (2023), entre outros também chegaram à mesma conclusão, o que indica que a técnica de estabilização química com cimento funciona tanto para solos como também para materiais resultantes de processo de beneficiamento de mineração (resíduo de mineração). Na Figura 2.16 pode-se observar o aumento da resistência do resíduo consoante o aumento do teor do cimento.

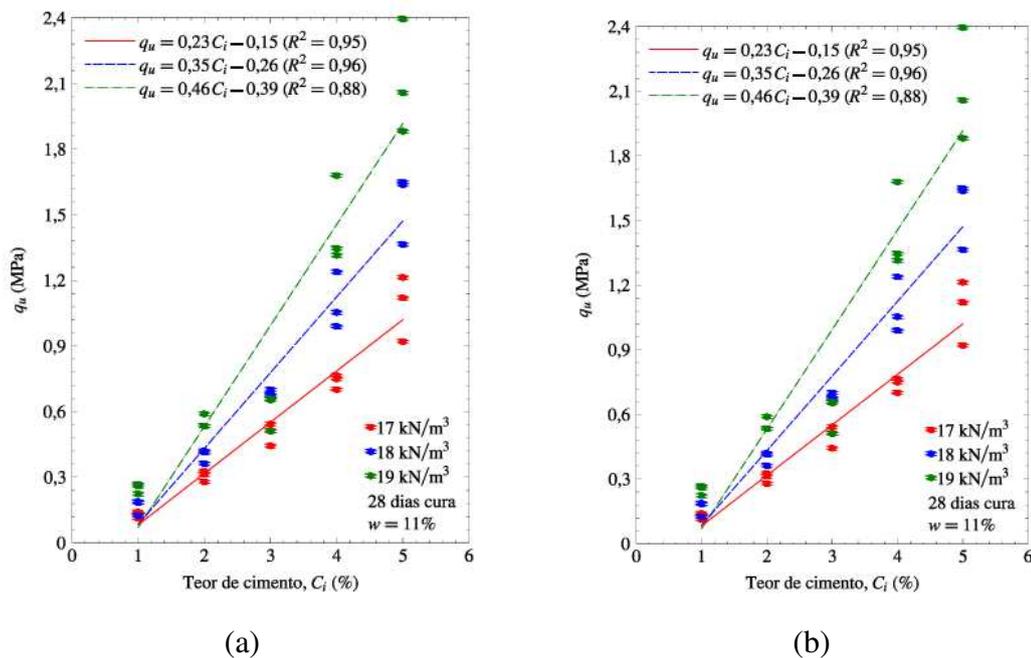


Figura 2. 16: Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (a) e tração (b) do resíduo de ferro.

Fonte: Mafessoli (2022)

Os resíduos de mineração, assim como citado no item 2.2.3, podem apresentar granulometrias diversas dependendo do tipo, da origem, do processo de beneficiamento e do método de disposição. Dessa forma, torna-se fundamental realizar estudos para determinar o teor adequado de estabilização para um resíduo de mineração específico, uma vez que a quantidade de cimento adicionada ao resíduo tem um impacto direto na qualidade e resistência do material final. Uma proporção inadequada pode resultar em um material frágil e instável. Ingles & Metcalf (1972) ressaltam que a eficiência do processo em campo tem se mostrado inferior aos ensaios realizados em laboratório. Diante disso, os autores recomendam aumentar a quantidade de cimento em 1,66 vezes em relação à quantidade encontrada em laboratório ao realizar o processo em campo, destacando-se como uma prática importante.

### 2.5.3.2 Efeito do teor de umidade

O teor de umidade é uma variável fundamental no processo de melhoramento de geomaterial com cimento, pois afeta diretamente na eficácia do processo. Em misturas solo-cimento, um teor de água mínimo deve ser assegurado para a hidratação total do cimento, assim quantidades maiores de teor de cimento demandam maior teor de umidade (Horpibulsuk *et al.* 2010). Por outro lado, o excesso de água no solo pode dificultar a reação química entre o cimento e os componentes do geomaterial. Segundo Ribeiro *et al.* (2003), o excesso de umidade durante a compactação do solo-cimento provoca um efeito negativo no desenvolvimento da resistência.

Normalmente o teor de umidade usado no processo de melhoramento é definido por meio do ensaio de compactação onde é definido o peso específico aparente seco máximo e o teor de umidade ótimo. O melhor desempenho do cimento pode ser obtido para areias, compactadas abaixo ou no teor ótimo, enquanto para siltes e argilas, a mistura deve ser compactada com um teor de umidade 1% a 2% superior ao teor ótimo determinado no ensaio de compactação (Felt, 1955). Contudo, Chaves (2023) destaca que amostras compactadas em teores de umidade abaixo da ótima, por exibirem uma estrutura mais floclada, apresentam maior resistência, menor compressibilidade e maior permeabilidade em comparação com amostras que foram compactadas com teores de umidade acima da ótima.

### 2.5.3.3 Efeito da porosidade da mistura

A porosidade exerce uma grande influência na resposta mecânica de materiais cimentados. Ela é inversamente proporcional à resistência mecânica, ou seja, a redução da porosidade resulta no aumento da resistência. Esse efeito benéfico da diminuição da porosidade na resistência foi relatado por vários pesquisadores, por exemplo Consoli *et al.* (2010, 2011, 2014, 2022) Moreira *et al.* (2019), Bruschi *et al.* (2022) Chaves *et al.* (2023) e pode ser percebido nitidamente observando a Figura 2.17.

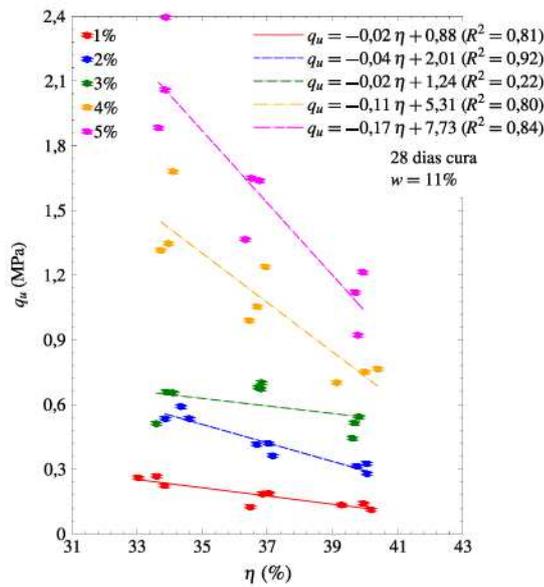


Figura 2. 17: Efeito da porosidade na resistência à compressão simples do resíduo de ferro com 11% de umidade.

Fonte: Mafessoli (2022)

Segundo Moreira (2020), a redução da porosidade do solo por meio da compactação proporciona um maior número de contato entre as partículas de solo, gerando maior capacidade de distribuição de tensões de atrito e normais no interior da amostra, além de maior entrelaçamento. Em materiais cimentados a redução da porosidade leva à formação de um meio mais denso, que por sua vez proporciona um melhor entrelaçamento entre as partículas constituintes e favorecer o desenvolvimento de uma matriz cimentícia devido ao aumento da área de contato entre os grãos (Saldanha *et al.*, 2017). Contudo, uma compactação inadequada pode prejudicar a eficácia do processo de estabilização, comprometendo a qualidade e a durabilidade do solo.

Chang e Woods (1992) demonstraram, através de microscopia eletrônica em diferentes areias com vários tipos de cimento, que a existência de um maior número de contatos entre partículas e gera uma maior possibilidade do cimento promover ligações efetivas nesses contatos, o que explica o aumento na taxa de ganho de resistência à tração com a redução da porosidade. A Figura 2.18 exibe a microestrutura de solo cimentado e não cimentado.

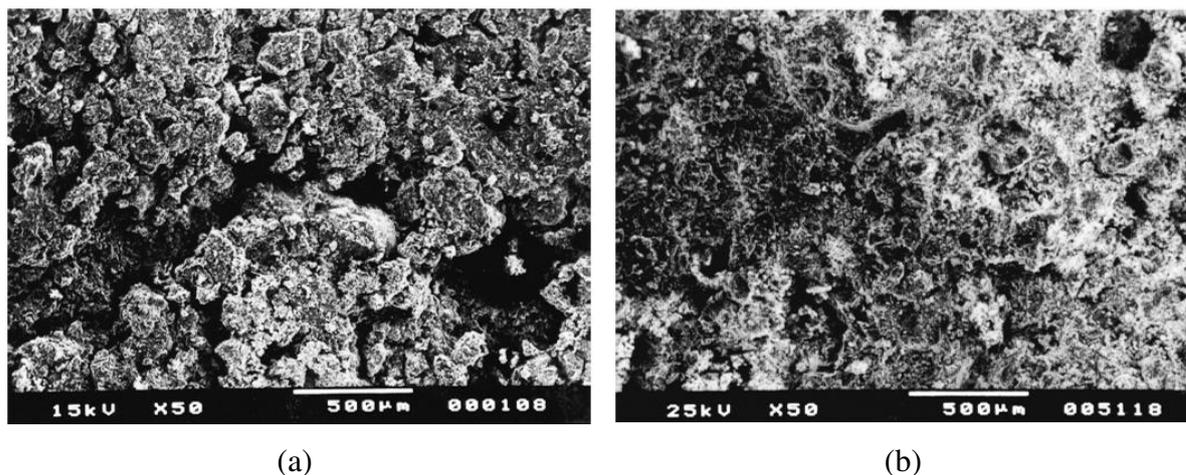


Figura 2. 18: Microestrutura de solo (a) sem cimentação e (b) com cimentação  
 Fonte: Chang e Woods (1992)

Felt (1955) em seus diversos ensaios como solos arenosos, argilosos e siltosos, constatou que a redução da porosidade influencia de forma positiva na perda de massa do solo tratado, especialmente em solos siltosos e argilosos, dado que amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem com menores porosidades resultaram em uma menor perda de massa.

#### 2.5.4 Dosagem do solo-Cimento

Com a dosagem do solo-cimento busca-se a determinação da proporção adequada de solo, cimento Portland e água a serem misturados para obter uma mistura de solo estabilizada que atenda aos requisitos mínimos de resistência, rigidez e durabilidade almejados. Diferente da argamassa e do concreto, a dosagem solo-cimento não se baseia apenas na relação água/cimento, pelo simples fato de que a compactação do solo-cimento não promove a expulsão completa de ar da mistura, tornando o preenchimento dos vazios com água ineficiente (CHAVES *et al.*,2023). Nesse sentido vários autores vêm desenvolvendo pesquisas a fim de estabelecer uma relação para solo-cimento, e resíduo que garanta a quantidade mínima de cimento necessário para atender às propriedades almejadas.

A ABNT NBR 12253 (2012) sugere o uso de teores específicos para diferentes tipos de solo. A Tabela 2.7 exhibe os teores recomendados para cada tipo de solo.

Tabela 2. 7: Previsão da quantidade de cimento Portland em função do tipo de solo

Tipo de solo	Teor de cimento sugerido, em massa (%)
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	9
A4	10

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12253 (2012)

Na Tabela 2.8 encontra-se exposta a previsão da quantidade de cimento Portland para estabilização de acordo com o tipo de solo proposto por Ingles e Metclaf (1972). O cimento é expresso em relação à massa de solo seco. Segundo Dallacort *et al.* (2002), solos com altas concentrações de argila necessitam de teores de cimento elevados devido à grande área superficial dos grãos.

Tabela 2. 8: Previsão da quantidade de cimento Portland em função do tipo de solo

Tipo de solo	Percentual de cimento a adicionar
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-iltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Fonte: Adaptado de Ingles e Metclaf (1972)

Consoli *et al.* (2007), propuseram um método de dosagem racional para misturas solo-cimento com base no uso do parâmetro porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/(C_{iv})$ ). Esse parâmetro relaciona a porosidade da mistura compactada ( $\eta$ ) e o teor volumétrico de cimento ( $C_{iv}$ ) ajustado pelo expoente interno  $k$ . Assim, através dessa relação é possível determinar a seguinte relação tipo potência:

$$q_u \text{ ou } q_t = A \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (2.1)$$

Onde:

$A$  – coeficiente escalar;

$B$  – expoente externo de ajuste da curva;

$k$  – expoente interno;

$q_u$  – resistência à compressão simples;

$q_t$  – resistência à tração por compressão diametral.

Na Figura 2.19 encontra-se a expressão da relação graficamente. O método consiste na elaboração da “curva de dosagem” que é justamente a curva exponencial porosidade/teor volumétrico de cimento versus resistência. Com essa curva é possível alterar o peso específico no qual a mistura deve ser compactada e a quantidade de cimento adicionado, permitindo equilibrar a escolha minimizando os custos.

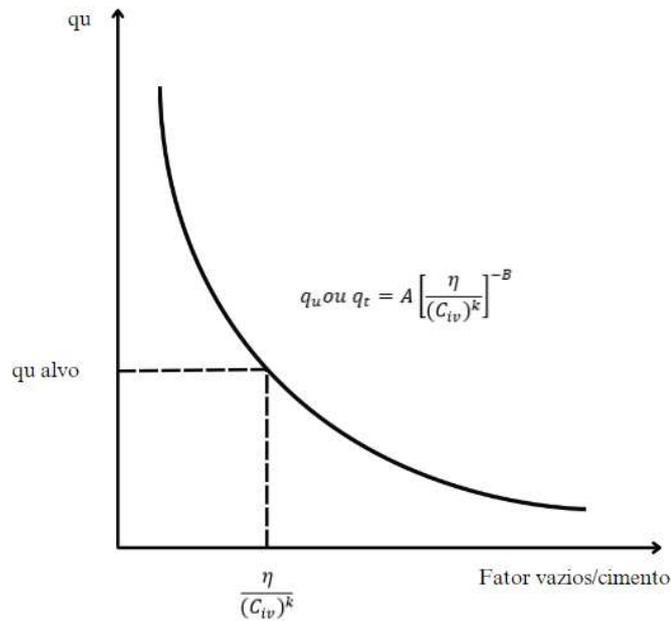


Figura 2. 19: Curva do fator vazios/cimento versus resistência à Curva do fator vazios/cimento versus resistência à compressão simples

Fonte: Adaptado de Consoli *et al.* (2007)

Do ponto de vista de Scheuermann Filho (2022) o expoente  $k$  compatibiliza a relações entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento em um determinado solo. Ele ainda continua afirmando que um  $k$  igual a um ( $k = 1$ ) indica que tanto a porosidade quanto o teor de cimento exercem influência equivalente em relação à resistência de um determinado solo misturado com cimento. Um  $k$  positivo menor que um ( $k < 1$ ) demonstra um efeito maior da porosidade em relação à resistência das misturas de solo cimentado. No entanto, um  $k$  maior que um ( $k > 1$ ) denota que a maior influência sobre a resistência é das ligações cimentícias.

Diambra *et al.* (2018) analisaram a equação e observaram que o coeficiente escalar  $A$ , é governado pelas propriedades tanto do solo como da matriz cimentícia e que é altamente influenciado pelas condições de cura, pois estas governam o desenvolvimento da fase de cimento. Eles também demonstraram teoricamente que os coeficientes  $k$  e  $B$  são dependentes essencialmente da matriz do solo e que  $k$ , aproximadamente o inverso de  $B$  ( $k \approx 1/B$ ). Dessa forma a equação (2.1) passa a ser apresentada como:

$$q_u \text{ ou } q_t = A \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})^{\frac{1}{B}}} \right]^{-B} \quad (2.2)$$

## 2.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE GEOMATERIAL CIMENTADO

### 2.6.1 Resistência à compressão simples e tração por compressão diametral

Os geomateriais quando melhorados com cimento sofrem uma alteração em diversos parâmetros inclusive parâmetros de resistência, que pode ser representada principalmente pela resistência à compressão e tração não confinada. A resistência à compressão simples ( $q_u$ ) e tração por compressão diametral ( $q_t$ ) geralmente são crescentes em função do grau de cimentação. Entretanto, o grau de cimentação não é representado somente pela porcentagem de cimento em relação à massa de solo seco. Outros fatores como a compactidade inicial, a forma e a natureza superficial das partículas, mineralogia estão relacionados à resistência (Prietto, 1996; Moreira, 2020; Chaves, 2023).

Dass *et al.* (1994) analisando a resistência à tração por compressão diametral, tração direta e compressão simples de amostras de areia artificialmente cimentadas percebeu que:

- A resistência à tração aumenta e a deformação específica na ruptura diminui com o aumento da porcentagem de cimento Portland;
- A deformação específica na ruptura é praticamente igual para os dois tipos de ensaio de tração;
- A razão entre a deformação específica na ruptura durante o ensaio de compressão simples e a deformação específica na ruptura durante o ensaio de tração varia entre 18 e 20 para todas as porcentagens de cimento utilizadas;
- A relação  $q_t/q_u$  varia de 11 a 12%.

Consoli *et al.* (2014) nas suas análises percebeu que a relação  $q_t/q_u$  de areia artificialmente cimentada apresenta uma maior faixa de variação, entre 9 e 18%, dependendo das características da areia e ligante empregado.

### 2.6.2 Resistência ao cisalhamento e tensão-deformação

A resistência ao cisalhamento se refere à capacidade do material resistir à deformação quando submetido a forças de cisalhamento. Ela corresponde à máxima tensão de cisalhamento a que um material pode resistir antes de seu rompimento, ou seja, antes de ocorrer o deslizamento entre as partículas que compõe o material. Se tratando de solo cimentado, parte da resistência e rigidez decorrem da ligação entre partículas, permitindo que o geomaterial cimentado exiba um comportamento disdito quando comparado à solo não cimentado (Consoli *et al.*, 2022; Daronco, 2022; Mafessoli, 2022; Consoli *et al.*, 2023; Bruschi *et al.*, 2023). A cimentação exerce uma influência notável no comportamento tensão-deformação do material e

tem sido reconhecida entre uma variedade de geomateriais, como argilas moles, argilas duras, solos granulares e solos residuais, resíduos e mineração (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001; Consoli *et al.*, 2007; Moreira, 2020; Consoli *et al.*, 2022; Consoli *et al.*, 2023; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; Chaves *et al.*, 2023; Bruschi *et al.*, 2023). Na Figura 2.20 pode ser visualizado o comportamento tensão-deformação de geomateriais com diferentes teores de cimento quando submetidos ao cisalhamento. Nota-se que tanto a resistência como a rigidez cresce com aumento do teor de cimento. A cimentação controla o comportamento do material até a quebra das ligações, pois a parcela coesiva é mobilizada primeiro (Lade e Trads, 2014). A partir daí, o componente de atrito entra em ação. Entretanto, se a matriz cimentícia for quebrada antes da fase de cisalhamento, a resposta do material será controlada pelo atrito e os efeitos da quantidade inicial de cimento sobre os parâmetros de tensão efetiva são desprezíveis (Rotta *et al.*, 2003).

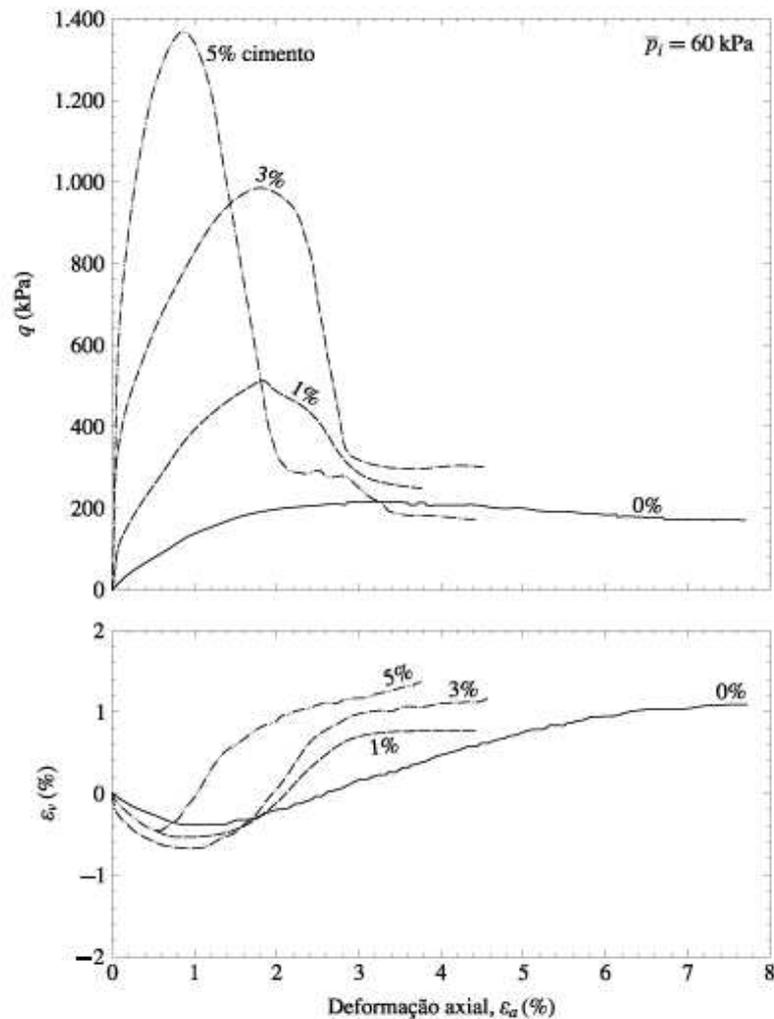


Figura 2. 20: Deformação axial versus tensão desvio e deformação axial versus poropressão para diferentes teores de cimento,  $\sigma_3 = 60 \text{ kN/m}^2$

Fonte: Schnaid, Prietto e Consoli (2001)

De acordo com Schnaid, Prietto e Consoli (2001), o comportamento tensão-deformação de solos cimentados quando submetidos ao cisalhamento pode ser descrito como sendo inicialmente rígido, aparentemente elástico-linear, até alcançar a plastificação, que ocorre em um ponto bem definido, a partir do qual o solo experimenta deformações plásticas crescentes até atingir a ruptura, que geralmente ocorre de maneira frágil. Essa rigidez inicial e resistência de pico apresentados são devidas à matriz cimentícia que impede o movimento relativo entre os grãos individuais e aumenta com o aumento do teor de cimento. O modo de ruptura se torna mais frágil com o aumento do teor de cimento (Prietto, 1996; Consoli *et al.*, 2007; Morreira, 2020; Scheuermann Filho, 2022).

Na Figura 2.21, observa-se que esse comportamento inicialmente rígido, aparentemente elástico-linear, até atingir a plastificação, também é evidenciado nos resíduos de mineração investigados por Mafessoli (2022), Consoli *et al.* (2022), Consoli *et al.* (2023), Chaves *et al.* (2023) e Bruschi *et al.* (2023). Além disso, nota-se uma ruptura frágil após o pico.

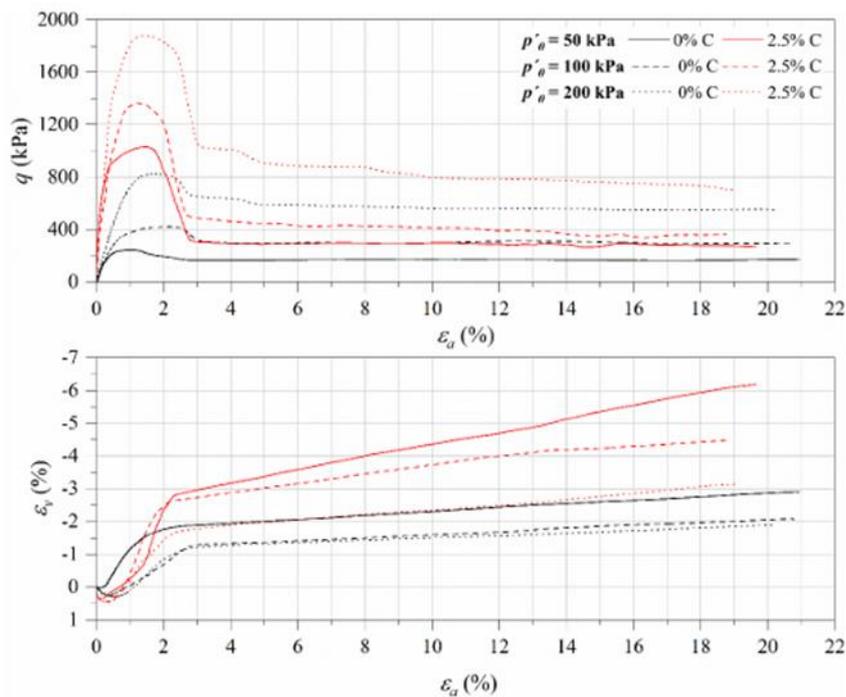


Figura 2. 21: Deformação axial versus tensão desvio e deformação axial versus poropressão de resíduo de ferro com e sem cimentação para diferentes tensões de confinamento

Fonte: Chaves *et al.* (2023)

Segundo Coop e Atkinson (1993) existem três maneiras de comportamento há serem constatadas durante o cisalhamento de geomaterial cimentado (Figura 2.22). Esses comportamentos dependem do estado inicial do corpo de prova em relação à curva de plastificação das ligações cimentícias.

- O primeiro comportamento ocorre quando a amostra é submetida ao cisalhamento sob baixas tensões efetivas. Nessa situação a amostra, cisalhada apresenta um pico de resistência para pequenas deformações, ultrapassando a linha de estado crítico, seguido de *strain-softening*, retornando à linha de estado crítico, caracterizando um comportamento frágil e dilatante;
- O segundo comportamento resulta de ensaio realizado em níveis intermediários de tensão efetiva. O escoamento ocorre durante a fase de cisalhamento. Observa-se o comportamento tensão versus deformação é aparentemente elástico-linear, até um ponto de plastificação, ao ocorrer a plastificação, ele passa a ser governado pelo componente friccional do material, sem a observação de pico de resistência;
- O terceiro comportamento acontece quando a amostra é exposta a tensões efetivas mais altas, em que a amostra ultrapassa a superfície de plastificação na fase de adensamento isotrópica, causando a quebra da cimentação. Seu comportamento é dúctil e compressivo durante o cisalhamento, similar ao da amostra sem cimentação, sendo controlado pelo seu componente friccional sem apresentar pico de resistência.

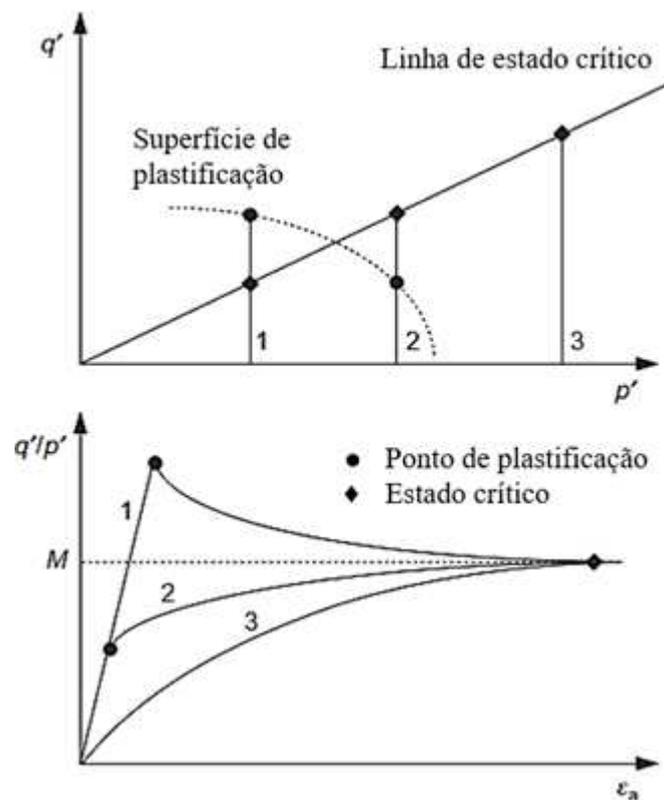


Figura 2. 22: Modelo de comportamento de um material com predominância da cimentação

Fonte: Chaves (2023)

É perceptível o impacto da cimentação no intercepto coesivo dos materiais melhorados. Entretanto, além do intercepto coesivo a cimentação geralmente promove um incremento do ângulo de atrito interno, devido a mudança de granulometria do material (Schnaid, Consoli, e Prietto, 2001; Consoli, Vendruscolo e Prietto, 2003). Whitehurst (1955), verificou um aumento no intercepto coesivo e no ângulo de atrito interno de um cascalho estabilizado com 4% de cimento, cujos valores de  $c$  e  $\phi$  aumentaram de 0,05MPa para 0,25MPa e de 36,5° para 51°, respectivamente, representando um aumento de 20% e 28,4%, respectivamente, como é mostrado na Figura 2.23. Entretanto, Consoli, Vendruscolo e Prietto (2003), verificaram através de ensaios triaxiais drenados com tensões efetivas ( $\sigma'$ ) de 20 a 100 kPa um significativo aumento nos parâmetros de resistência de uma areia fina tratada com 7% de cimento Portland. O intercepto coesivo de pico ( $c_p$ ) passou de 0 kPa para 170 kPa e o ângulo de atrito interno de pico ( $\phi_p$ ) aumentou de 37° para 52°.

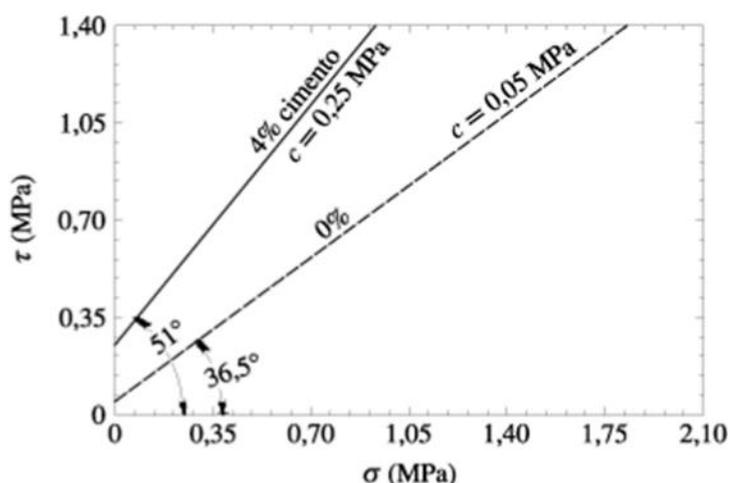


Figura 2. 23: Modelo de comportamento de um material com predominância da cimentação Alteração na resistência à compressão triaxial devido a adição de 4% de cimento em um cascalho

Fonte: adaptado de Mafessoli (2023)

## 2.7 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE GEOMATERIAL CIMENTADO

### 2.7.1 MÉTODOS CONSOLI (2014) – ESTIMATIVA DE $C'$ E $\Phi'$

Parâmetros de resistência como o ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento ( $\phi'$ ) e o intercepto de coesão efetiva ( $c'$ ), normalmente são obtidos por meio de ensaios complexos e demorados. No entanto, Consoli (2014) no seu trabalho desenvolveu uma metodologia que permite estimar  $c'$  e  $\phi'$  para solos cimentados, sem a necessidade de realização de ensaios triaxiais ou quaisquer outros ensaios complexos e demorados. A proposta do método é estimar os parâmetros  $c'$  e  $\phi'$  com base nos valores de resistência à tração por compressão diametral ( $qt$ )

e de compressão simples ( $qu$ ). Esse método foi deduzido a partir do círculo de Mohr-Coulomb apresentado na Figura 2.24.

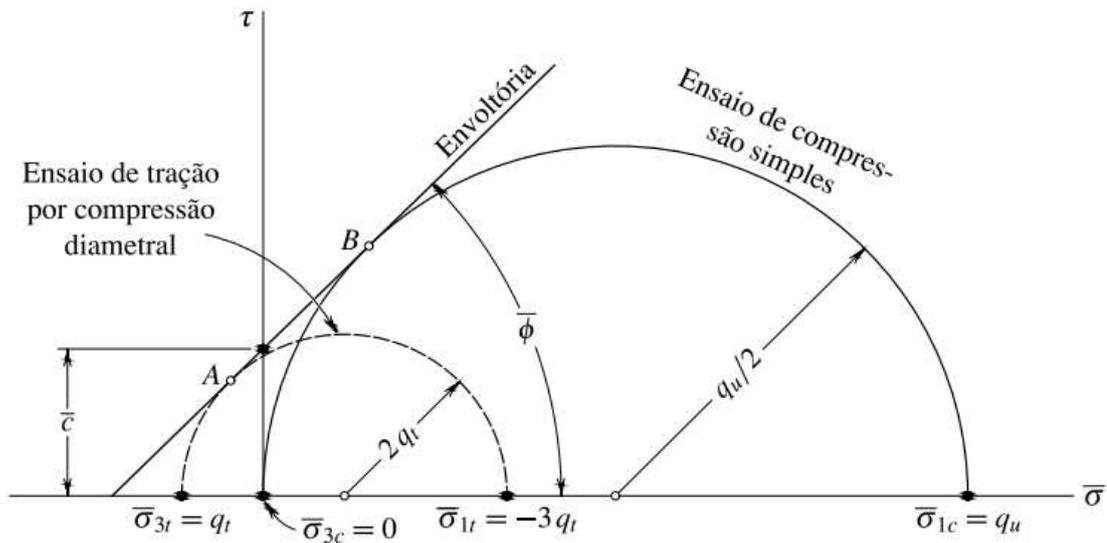


Figura 2. 24:Dedução do método proposto a partir do círculo de Mohr-Coulomb

Fonte: Consoli (2014)

Nos ensaios de compressão simples a tensão efetiva mínima ( $\sigma_3$ ) é igual a zero e a tensão principal efetiva principal máxima ( $\sigma_1$ ) é igual a  $qu$ . Nos ensaios de tração por compressão diametral, de acordo com Jaeger, Cook e Zimmerman (2007), a tensão efetiva mínima ( $\sigma_3$ ) é igual a  $qt$  e a tensão principal efetiva principal máxima ( $\sigma_1$ ) é igual a  $-3qt$ . Dessa forma, segundo Consoli (2014), o ângulo efetivo de resistência ao cisalhamento ( $\phi'$ ) e o intercepto de coesão efetiva ( $c'$ ) podem ser obtidas através das equações (2.3) e (2.4) respectivamente.

$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4 q_t / q_u}{1 - 2 q_t / q_u} \right) \quad (2.3)$$

$$c' = \frac{q_u \left[ 1 - \left( \frac{1 - 4 q_t / q_u}{1 - 2 q_t / q_u} \right) \right]}{2 \cos \left[ \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4 q_t / q_u}{1 - 2 q_t / q_u} \right) \right]} \quad (2.4)$$

Com base nos estudos de Consoli *et al.* (2012b, 2013), pode-se afirmar que a razão  $qt/qu$  resulta num escalar ( $\xi$ ) para a mistura solo-cimento, independente da relação porosidade/cimento. Dessa forma inserindo o escalar ( $\xi$ ) na equação (2.3) e (2.4) os parâmetros  $\phi'$  e  $c'$  passam a ser expressos pelas equações (2.5) e (2.6)

$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \quad (2.5)$$

$$c' = \frac{q_u \left[ 1 - \left( \frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \right]}{2 \cos \left[ \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi} \right) \right]} \quad (2.6)$$

### 2.7.2 MÉTODOS MITCHELL (1981) – ESTIMATIVA DE $c'$ E $\phi'$

O método do Mitchell (1981) é usado para estimar parâmetros da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb ( $\phi'$  e  $c'$ ) para solos granulares. O método propõe as seguintes relações apresentadas nas equações (2.7) e (2.8) para estimar o ângulo de atrito e o intercepto coesivo respectivamente.

$$\phi' = 40^\circ \Leftrightarrow 45^\circ \quad (2.7)$$

$$c' = 50 + 0,255 \times q_u \quad (2.8)$$

Assim como no método de Consoli (2014), o intercepto coesivo varia em função da resistência a compressão simples ( $q_u$ ).

### 2.7.3 MÉTODO DE SCHNAID, PRIETTO E CONSOLI (2001) – ESTIMATIVA DE TENSÃO DESVIADORES DE RUPTURA (PICO)

A resistência ao cisalhamento do solo cimentado ( $q_f$ ) medida em ensaios triaxiais convencionais, pode ser determinada em função da resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) e do ângulo de atrito efetivo de pico de solo não cimentado ( $\phi'$ ) (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001). Essa estimativa é feita por meio de duas equações: a equação 2.7 que determina analiticamente o valor da tensão desviadora na ruptura, obtida em ensaios triaxiais para solos não coesivos e não cimentados; e a equação 2.8 que estima analiticamente o valor da tensão desviadora na ruptura, obtida em ensaios triaxiais para solos cimentados artificialmente.

$$q_{f/u} = \frac{2 \times \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \times p'_i \quad (2.7)$$

$$q_f = \frac{2 \times \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \times p'_i + q_u \quad (2.8)$$

Essas equações foram desenvolvidas considerando como válidas as seguintes hipóteses:

- as envoltórias de pico de força são lineares;
- os ângulos de atrito tanto do solo não cimentado quanto do solo cimentado têm a mesma magnitude;
- o solo na condição não cimentada é não coeso, ou seja, o intercepto coesivo efetivo ( $c'$ ) equivale a 0;
- a contribuição do atrito para a resistência ao cisalhamento é independente do teor de cimento.

### 3. MATERIAIS E METODOS

Este capítulo aborda os materiais utilizados, o programa experimental, os métodos aplicados durante o desenvolvimento da pesquisa, o projeto experimental e seus graus de complexidade, a preparação das amostras e os principais detalhes sobre a execução dos ensaios.

#### 3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do projeto foi feito o uso de alguns materiais como resíduo de bauxita, cimento Portland de alta resistência inicial CP V – ARI, e água destilada. Mais detalhes sobre cada um deles encontram-se explanados nos subtópicos seguintes.

##### 3.1.1 Resíduo de mineração de bauxita

O resíduo de mineração de bauxita usado na pesquisa, apresentado na Figura 3.1, é oriundo da Alumar que é um dos maiores complexos industriais de produção de alumina e alumínio do mundo formado pelas empresas Alcoa, Rio Tinto e South32.



Figura 3. 1: Amostra do Resíduo de Bauxita  
Fonte: Autor (2024)

Os resíduos produzidos pela ALUMAR são provenientes do beneficiamento do minério de bauxita, que segue o processo de Bayer. Os resíduos são depositados em grandes reservatórios denominadas de Áreas de Resíduo de Bauxita (ARB's). Essas ARB's são enumeradas em ordem cronológica de operação. Da ARB 6 (Figura 3.2), que operou no período de 2017 a 2019, foi coletado um volume de 300 litros do material no estado saturado.

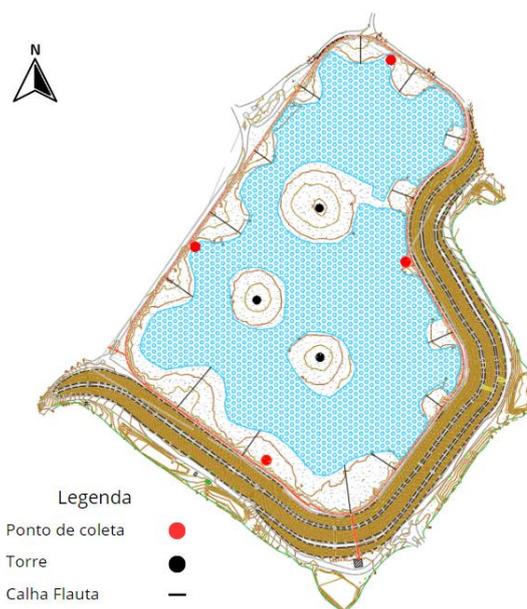


Figura 3. 2: Area de Resíduo de Bauxita 6  
Fonte: Autor (2024)

A coleta foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR 10007 (2004d). A área superficial da ARB 6 foi dividida em uma rede quadriculada, e amostras foram retiradas nas extremidades em quatro pontos. Os pontos de coleta estão localizados próximos aos pontos de lançamento, conforme ilustrado na Figura 3.3, que mostra os pontos de coleta e os pontos de lançamento (torres e calhas flauta).



(a)



(b)

Figura 3. 3: Amostragem do material na ARB 6  
Fonte: Autor (2024)

Em cada área foram coletadas amostras a 50 cm e 1 m de profundidade e posteriormente homogeneizadas e depositadas nos recipientes. Nos recipientes encontram-se registrados a

identificação das amostras e rótulos com informações do material (Figura 3.4). Após a coleta o material foi transportado da Alumar para a UFCG onde foi posteriormente seco em estufa a uma temperatura de aproximadamente 80°C.



Figura 3. 4: Receção das amostras

Fonte: Autor (2024)

### 3.1.2 Cimento Portland de alta resistência inicial CP V – ARI

O material cimentante utilizado nesse estudo, apresentado na Figura 3.5, foi cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). Esse aglomerante é formulado para desenvolver resistência rapidamente após o início do processo de cura.



Figura 3. 5: Amostra do cimento Portland CP V - ARI

Fonte: Autor (2024)

Foi definido usar esse tipo de cimento, pois de acordo com a ABNT: NBR 16697 (2018) esse cimento não contém adições em sua composição, em casos excepcionais pode conter até 10% de material carbonático. Além disso o fato do material apresenta um avançado estágio de hidratação, gerando uma menor dispersão dos resultados contribuiu para a escolha desse aglomerante. Foi determinada a massa específica do cimento com base na ABNT NBR 16605 (2017) e foi obtido um valor de 2,99 g/cm<sup>3</sup>. O resultado mostrou ser coerente com o informado pela Empresa Nacional na sua Ficha de informações de segurança de produtos químicos.

### 3.1.3 Água

A água utilizada nos processos experimentais foi água destilada com o intuito de evitar a adição de conteúdos durante o processo de preparo do material.

## 3.2 MÉTODOS

Segundo Prodanov (2013) existem várias formas de classificar as pesquisas dependendo do método usado para atingir os objetivos. Com base nas formas clássicas de classificação a pesquisa pode ser classificada com quanto à natureza, objetivos, procedimentos técnicos e abordagem. Na Tabela 3.1 é apresentada a classificação da presente pesquisa quanto à natureza, objetivos, procedimentos e abordagem.

Tabela 3. 1: Tipologia e classificação da pesquisa científica

Tipologia	Classificação da pesquisa
Natureza	Aplicada
Objetivos	Exploratória
Procedimentos técnicos	Experimental
Abordagem	Quantitativa

Fonte: Autor (2024)

O processo de pesquisa se dá em 6 fases específicas de acordo com o fluxograma que se encontra exposto na Figura 3.6.

A primeira fase abrange todo o processo de coleta, secagem e homogeneização das diferentes amostras de resíduo de bauxita. A segunda fase é dedicada à análise da variabilidade entre as diferentes amostras de resíduo. Conta com a determinação das características como a mineralogia (difração de raio X), a granulometria, os limites de consistência, e a massa específica das diferentes amostras, para fins comparativos.

Após as análises desenvolvidas na segunda fase foi prosseguido com a terceira fase, onde foi definido o material de estudo e foi dado sequência com o desenvolvimento do ensaio de compactação. Também foram desenvolvidos no resíduo de bauxita ensaios de caracterização químicas (adsorção do azul de metileno, pH, fluorescência de raio X) e ambiental (lixiviação e solubilização).

A quarta fase se resume no estudo da interação resíduo ligante (cimento Portland). Inicialmente foi delimitando todo o programa experimental definindo as variáveis controladas, fixadas, de resposta e de ruído. Após isso foi dado sequência com o desenvolvimento dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e compressão triaxial. Ainda nessa fase foram desenvolvidos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo melhorado.

Na quinta fase foi verificado a viabilidade de utilização e adequação do índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ) com a resistência à compressão simples e tração na compressão diametral por meio da obtenção da curva de dosagem  $\eta/Civ$ .

Por fim na sexta fase foram desenvolvidas as análises de estabilidade das pilhas com base nos resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos ao longo do processo investigativo. Essas análises foram feitas usando o software Slide 2 da Rocscience.

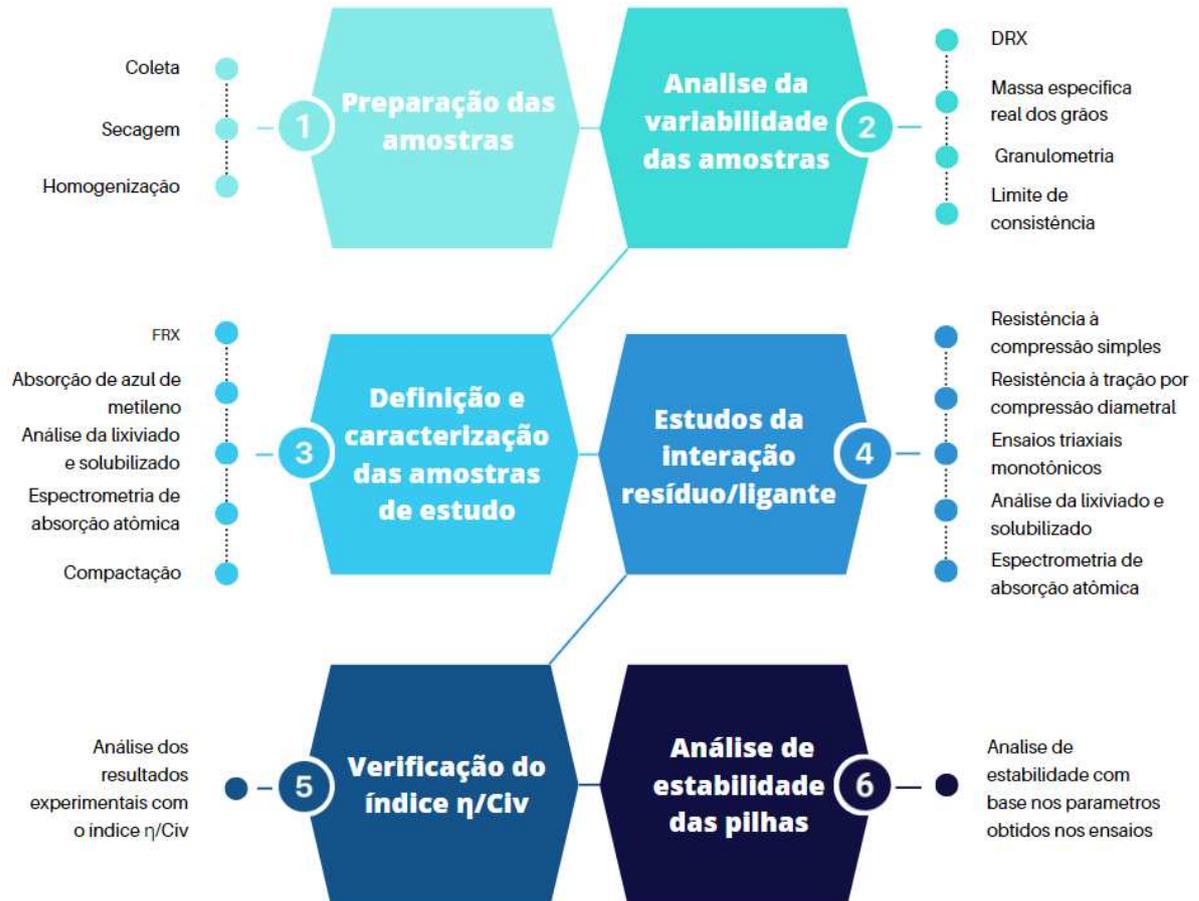


Figura 3. 6: Fluxograma de pesquisa

Fonte: Autor (2024)

### 3.2.1 Caracterização do material

Os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de engenharia de pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os ensaios de caracterização química foram desenvolvidos no Laboratório de materiais avançados da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os ensaios de caracterização mineralógica foram executados no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Nanocompósitos (LAMMEN) da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade Federal de Rio Grande do Norte (UFRN). Tanto os ensaios de caracterização química e mineralógica foram desenvolvidos com o intuito de identificar os principais componentes químicos e mineralógicos do material, e averiguar as possíveis reações pós mistura com cimento. Os ensaios de caracterização ambiental foram desenvolvidos em duas etapas. A

primeira conta com os ensaios de lixiviação e solubilização desenvolvidas no Laboratório de Gestão e Tratamento de Resíduos (LABGER) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A segunda etapa conta com as análises de metais e as demais substâncias que foram desenvolvidas no laboratório da MR Ambiental, localizada em Recife.

Todos os ensaios de caracterização desenvolvidos encontram-se destacado na Tabela 3.2 assim como as respectivas normas.

Tabela 3. 2: Ensaios de caracterização

Caracterização	Ensaios	Normas
Física	Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2016
	Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/2016
	Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/2016
	Compactação	ABNT NBR 7182/2020
	Massa específica dos grãos do solo	ABNT NBR 6458/2017
	Massa específica Cimento Portland	ABNT NBR 16605/2017
Química	Adsorção do Azul de Metileno	ASTM C837/2019
	pH	ASTM D4972/2019
	Fluorescência de raio X	ABNT NBR 16137
Mineralógica	Difração de raio X	---
Ambiental	Lixiviação	ABNT NBR 10005/2004b
	Solubilização	ABNT NBR 10006/2004c
	Espectrometria de absorção atômica	---

Fonte: Autor (2024)

Para a classificação do material foi tomado como base o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), normalizado pela ASTM D2487 (2017). As faixas granulométricas, indicadas na curva de distribuição granulométrica, foram especificadas com base nas normas ASTM D653 (2014) e ABNT NBR 6502 (1995).

Os componentes químicos do material estudado foram obtidos por meio da espectrometria de fluorescência de raios X. O equipamento usado foi o Espectrômetro de fluorescência de raios X por Energia Dispersiva da marca Shimadzu modelo EDX-720. Os componentes mineralógicos presentes no material estudado foram obtidos por meio da difração de raios X, realizada em um difratômetro de raios X da marca BRUKER AXS, modelo D2 PHASER.

Os extratos obtidos do ensaio de lixiviação e solubilização foram analisados segundo o Método Padrão de Análise da Água e Águas residuais (SMEWW - 3030 E, SMEWW - 3120 B). A caracterização do lixiviado e do solubilizado do resíduo de bauxita foi realizada de acordo com a ABNT NBR 10.004 (2004a).

### 3.2.2 Planejamento experimental

Para o programa experimental foram definidos quatro tipos de variáveis para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral: as controladas, as fixadas, as de resposta, e as de ruído. Todas elas encontram-se especificadas na Tabela 3.3, 3.4, 3.5, e 3.6 respectivamente.

Tabela 3. 3: Variáveis controladas

Variáveis controladas	Unidade	Níveis
Teor de material cimentante	%	2%, 4%, 6%
Peso específico aparente seco	kN/m <sup>3</sup>	18, 19, 20

Fonte: Autor (2024)

Tabela 3. 4: Variáveis fixadas

Variáveis fixadas	Unidade	Níveis
Tipo de material cimentante	---	CP V – ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial
Tipo de resíduo	---	Resíduo de mineração de bauxita
Tempo de cura	dias	7
Umidade	%	18% (+/- 0,5%)

Fonte: Autor (2024)

Tabela 3. 5: Variáveis de resposta

Variáveis	Unidade	Níveis
Resistência à compressão simples e tração por compressão diametral	kPa	Avaliar o acréscimo de resistência à compressão em função do teor de cimento no resíduo e do peso específico aparente seco

Fonte: Autor (2024)

Tabela 3. 6: Variáveis de ruído

Variáveis	Medidas de controle
Equipamento e operador	Emprego de um único equipamento com um único operador
Homogeneidade do resíduo	Uso de uma única amostra, coletada uma única vez

Fonte: Autor (2024)

Os teores de material cimentante foram definidos como 2%, 4% e 6% com base nos teores normalmente usados na literatura. Pesquisas como os de Schnaid, Prietto e Consoli (2001), Morreira (2020), Consoli *et al.* (2022), Scheuermann Filho e Consoli (2023), Jafari *et al.* (2023), Chaves *et al.* (2023), Daronco (2022), Mafessoli (2022) entre outros evidenciaram que valores da ordem de 6%, 5% ou menos são completamente satisfatórios para estabilizar um geomaterial granular. Dado ao fato do cimento ser um material nobre, se torna interessante trabalhar com teores mínimos necessários para garantir uma boa estabilização do material. Para ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral não foi possível trabalhar com 0% de cimento, pois no processo de saturação por imersão, os corpos de provas (CP's) se desfaziam por completo. Os pesos específicos aparentes secos foram definidos como 18, 19 e

20 kN/m<sup>3</sup> com base no resultado do ensaio de compactação na energia Proctor normal. Devido à limitação do equipamento de moldagem dos CP's, não foi possível trabalhar com pesos específicos aparentes secos superiores a 20 kN/m<sup>3</sup>. Foram usados tanto três teores de material cimentante como três pesos específicos aparentes secos com o intuito de averiguar a influência do teor de material cimentante e da porosidade do material na resistência do material melhorado. Assim como os pesos específicos aparentes secos, o teor de umidade também foi definido como 18% com base no resultado do ensaio de compactação.

O tempo de cura foi definido para 7 dias, dado que o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), assim como mostrado na Figura 3.7, tem a peculiaridade de atingir altas resistências nos primeiros dias da aplicação.

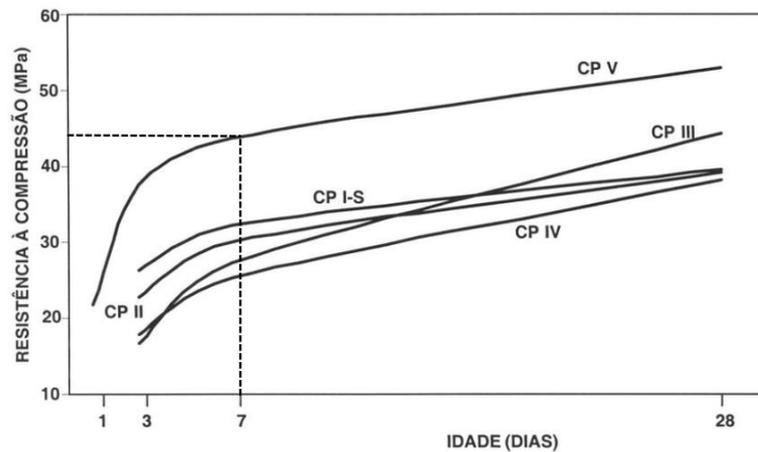


Figura 3. 7: Evolução da resistência à compressão simples para diferentes tipos de cimento  
Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram feitos ensaios em triplicadas conforme apresentado na Figura 3.8.

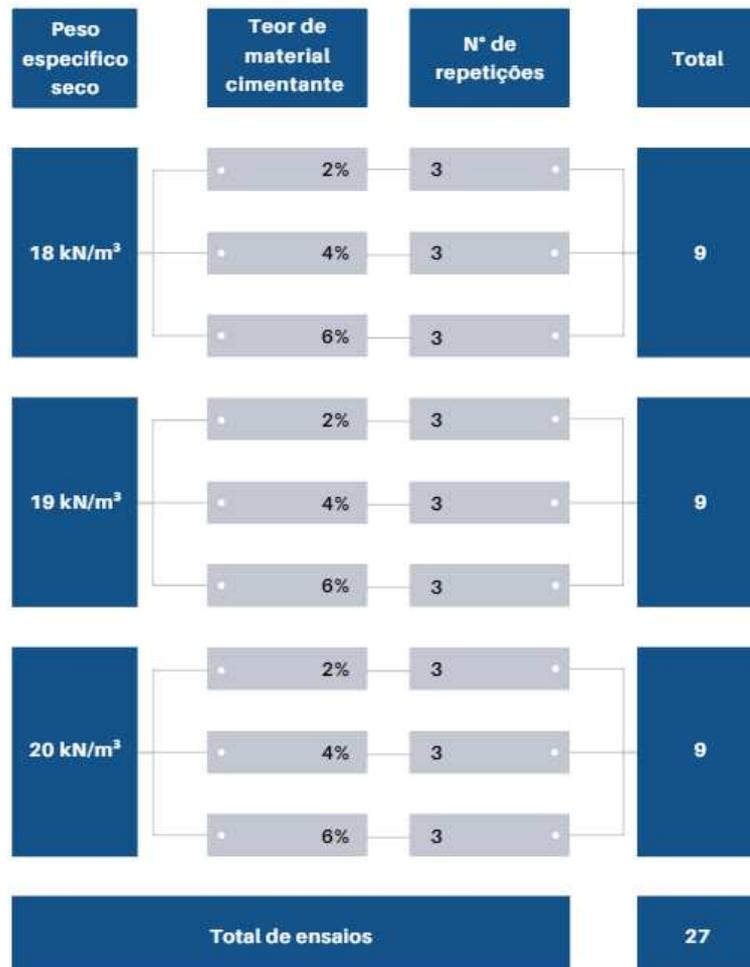


Figura 3. 8: Programa dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral  
 Fonte: Autor (2024)

Os ensaios de compressão triaxial foram desenvolvidos com o intuito de comparar a resistência ao cisalhamento do resíduo puro com o resíduo melhorado com cimento. Nesse sentido, os ensaios foram planejados conforme mostrado na Figura 3.9. Devido às propriedades do material e o tempo necessário para a execução do ensaio nesse tipo de material, foram desenvolvidos ensaios triaxiais apenas para o peso específico aparente seco máximo de 20 kN/m<sup>3</sup>. Além do peso específico aparente seco, o tempo de cura foi fixado em 7 dias e a umidade em 18%. Não foi possível desenvolver ensaios com teores de 4% e 6% devido às limitações do aparelho.

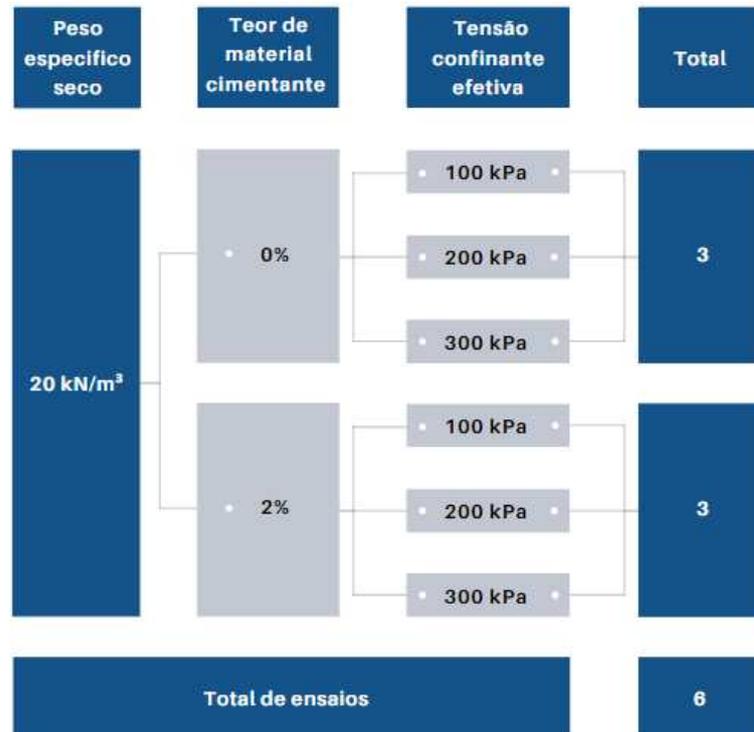


Figura 3. 9: Programa dos ensaios de compressão triaxial

Fonte: Autor (2024)

Nos ensaios de lixiviação e solubilização, conforme ilustrado na Figura 3.10, o peso específico aparente seco foi mantido em 20 kN/m<sup>3</sup>, enquanto o teor de cimento foi variado em 0%, 2% e 6%. A unidade de moldagem dos corpos de prova (CP's) foi fixada em 18%, e o tempo de cura dos CP's cimentados foi de 7 dias. Optou-se por trabalhar com 6% de teor de cimento nesses ensaios, buscando investigar a possível existência de algum efeito benéfico da adição de cimento sobre o material lixiviado e solubilizado.

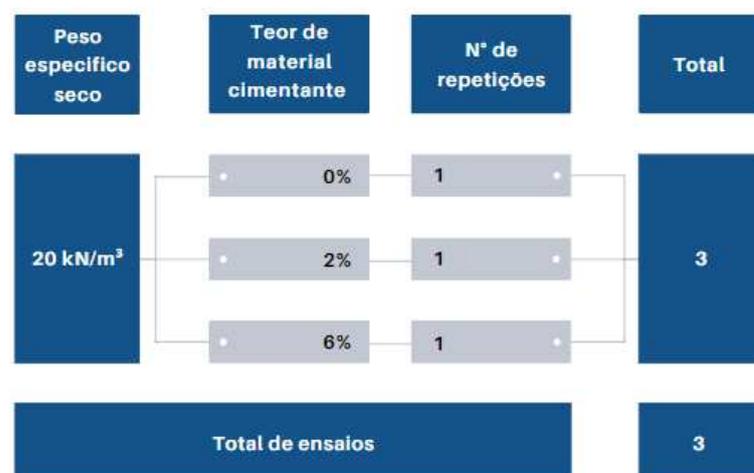


Figura 3. 10: Programa dos ensaios de lixiviado e solubilizado

Fonte: Autor (2024)

### 3.2.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (CP's) foram confeccionados conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 12024/2012. Inicialmente, o resíduo de bauxita passou por processos de secagem, destorroamento e peneiramento utilizando a peneira nº 4 (4,75 mm). Posteriormente, o cimento e o resíduo de bauxita foram individualmente pesados e minuciosamente combinados até alcançarem uma mistura homogênea. Após isso, água destilada foi então adicionada à mistura. Em seguida, prosseguiu-se com a homogeneização da mistura até atingir a uniformidade desejada.

A quantidade de material usada na mistura foi determinada de modo a ser suficiente para a moldagem dos CP's, permitindo a retirada de pequenas porções para a verificação da umidade da mistura. A massa da amostra foi dividida em três porções para ser compactado. Do material restante, uma parcela foi coletada e encaminhada para a estufa, onde a umidade da mistura foi verificada.

Para a compactação dos CP's foi utilizado o molde cilíndrico tripartido de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e a prensa. Ambos se encontram ilustrados na Figura 3.11.



Figura 3. 11: molde tripartido e a prensa  
Fonte: Autor (2024)

Os CP's foram compactados estaticamente em três camadas e as interfaces entre cada camada foi escarificada de forma a garantir a adesão total entre elas. Após a compactação, os CP's foram removidos do molde e medidas de altura, diâmetro e massa foram registradas. Foram consideradas adequadas as amostras que seguiam os seguintes critérios:

- Grau de compactação:  $\pm 2,0\%$  do valor alvo;
- Teor de umidade (w):  $\pm 0,5\%$  do valor alvo;
- Diâmetro:  $1,0\%$  do valor alvo;

- Altura: 2% do valor alvo.

Em seguida os CP's foram curados em embalagens de plástico, isolados do ambiente externo com o intuito de evitar a perda de umidade.

### 3.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), foram desenvolvidos segundo os procedimentos da ABNT NBR 12025/2012 e foram usados CP's com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Esses ensaios foram realizados após 7 dias de cura dos CP's. Contudo, é importante salientar que no sexto dia os CP's foram imersos em água, garantindo assim 24 horas de imersão antes da ruptura. O intuito da imersão é elevar a saturação dos CP's e minimizar o efeito da sucção na resistência à compressão simples (Saldanha e Consoli, 2016).

O procedimento de ruptura dos corpos de prova foi conduzido utilizando a prensa hidráulica Shimadzu, com uma velocidade de deformação de 1,14 mm/min. A Figura 3.12 ilustra o equipamento em operação durante o ensaio do CP.



Figura 3. 12: Prensa hidráulica Shimadzu  
Fonte: Autor (2024)

A determinação da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) é feita através da divisão da carga de ruptura registrada durante o ensaio, pela área transversal do corpo de prova, conforme a equação 3.1.

$$q_u = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad (3.1)$$

Onde:

- $q_u$ : Resistência à compressão simples;
- $Q$ : Carregamento axial máxima aplicado ao corpo de prova;
- $d$ : Diâmetro médio do corpo de prova.

### 3.2.5 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), foram executados segundo os procedimentos da NBR 7222 (ABNT, 2016). Assim como no ensaio RCS, foram usados CP's com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura com 7 dias de cura. Esses CP's no sexto dia também imersos em água, garantindo assim 24 horas de imersão antes da ruptura. O intuito da imersão, assim como explicado no item 3.2.4, é elevar a saturação dos CP's e minimizar o efeito da sucção na resistência à compressão simples.

O procedimento de ruptura dos corpos de prova foi conduzido utilizando a prensa hidráulica Shimadzu, com uma velocidade de deformação de 1,14 mm/min. A Figura 3.13 ilustra o equipamento em operação durante o ensaio do CP.

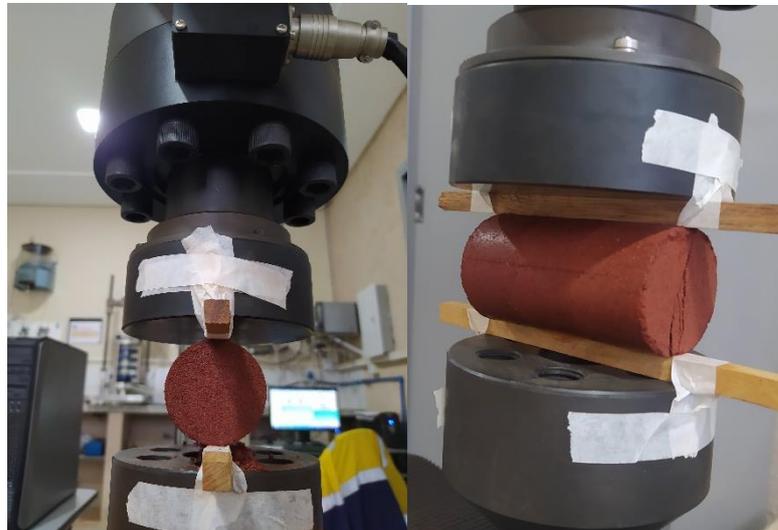


Figura 3. 13: Prensa hidráulica Shimadzu  
Fonte: Autor (2024)

A determinação da resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) é feita através da divisão da carga de ruptura registrada durante o ensaio, pela área transversal do corpo de prova, conforme a equação 3.2.

$$q_t = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (3.2)$$

Onde:

- $q_t$ : Resistência à compressão simples;
- $Q$ : Carregamento axial máximo aplicada ao CP;
- $d$ : Diâmetro médio do CP;
- $h$ : Altura média do CP.

### 3.2.6 Ensaio de compressão triaxial

A resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita foi investigada por meio do ensaio de compressão triaxial com deformação controlada. Os ensaios foram conduzidos com

consolidação isotrópica e cisalhamento não drenado (CIU), conforme os procedimentos estabelecidos pela ASTM D4767(2020) – *Consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*. Foram usados corpos de prova com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Todos os ensaios compreenderam quatro etapas principais: percolação, saturação, consolidação e cisalhamento. Importa ressaltar que entre essas etapas foram implementados procedimentos específicos, tais como:

- Desaeração da água: todo o volume de água utilizado no sistema foi previamente desaerado;
- Percolação de CO<sub>2</sub>: antes da percolação com água, foi realizado um processo de percolação com gás CO<sub>2</sub> na amostra, com duração de 30 minutos;
- Aplicação e manutenção de uma tensão confinante de 20 kPa durante as fases de percolação e saturação;
- Aplicação de incrementos de tensão confinante e contrapressão equivalentes (mantendo-se uma tensão efetiva de 10 kPa), em intervalos de tempo iguais, até alcançar um parâmetro B de Skempton (1954) mínimo desejado.

Cada ensaio teve início após um período de cura de 4 dias, uma vez que as etapas de percolação e saturação requereram um total de 3 dias. O processo de saturação era encerrado quando um parâmetro B na faixa de 0,93 a 1,0 era alcançado. No sétimo dia, os CP's foram submetidos ao processo de consolidação isotrópica sob tensões definidas para o ensaio (100 kPa, 200 kPa e 300 kPa). O processo de cisalhamento era iniciado logo após a estabilização volumétrica do CP. Todos os ensaios foram desenvolvidos com uma taxa de cisalhamento de 0,06 mm/h.

Para realizar os ensaios, foi utilizado aparelho o triaxial da IPC Global apresentado na Figura 3.14.



Figura 3. 14: Aparelho o triaxial da IPC Global  
Fonte: Autor (2024)

Os ensaios de compressão triaxial, assim como citado no item 3.2.2, foram realizados em amostras com 0% e 2% de cimento com deformação controlada e sob as mesmas condições (tensão de confinamento, taxa de deformação). Essa configuração permitiu avaliar alterações no comportamento tensão-deformação do resíduo, incluindo trajetória de tensões, padrão de geração das deformações e poropressões, mudanças nos parâmetros de resistência de pico e residuais.

O comportamento dos solos na ruptura é geralmente descrito através do critério de Mohr-Coulomb, expresso pela equação 3.3 e ilustrado na Figura 3.15.

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \times \tan \phi' \quad (3.3)$$

Onde:

$\tau_f$  – Tensão cisalhante na ruptura;

$c'$  – Intercepto coesivo efetivo;

$\sigma'_f$  – Tensão normal efetiva na ruptura;

$\phi'$  – ângulo de atrito efetivo.

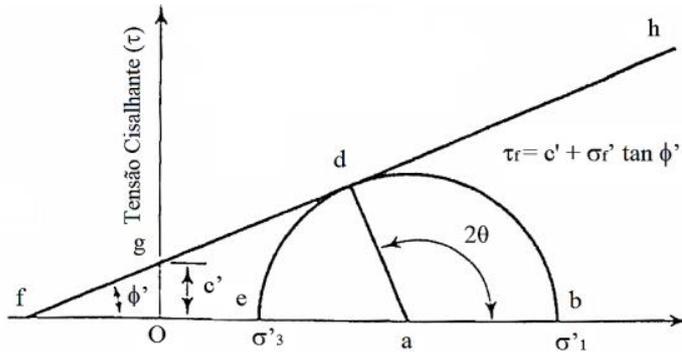


Figura 3. 15: Representação do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Fonte: Hoch (2022)

Visando a simplificação das análises foi também adotado o diagrama  $p'$  x  $q$  de Cambridge apresentado na Figura 3.16 onde o  $p'$  e o  $q$  são dados pelas equações 3.4 e 3.5 respectivamente.

$$p' = \frac{1}{3} \times (\sigma_1 + 2 \times \sigma_3) \tag{3.4}$$

$$q = \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{3.5}$$

Onde:

$\sigma_d$  – tensão desviadora;

$\sigma_1$  – tensão máxima de resistência;

$\sigma_3$  – tensão confinante.

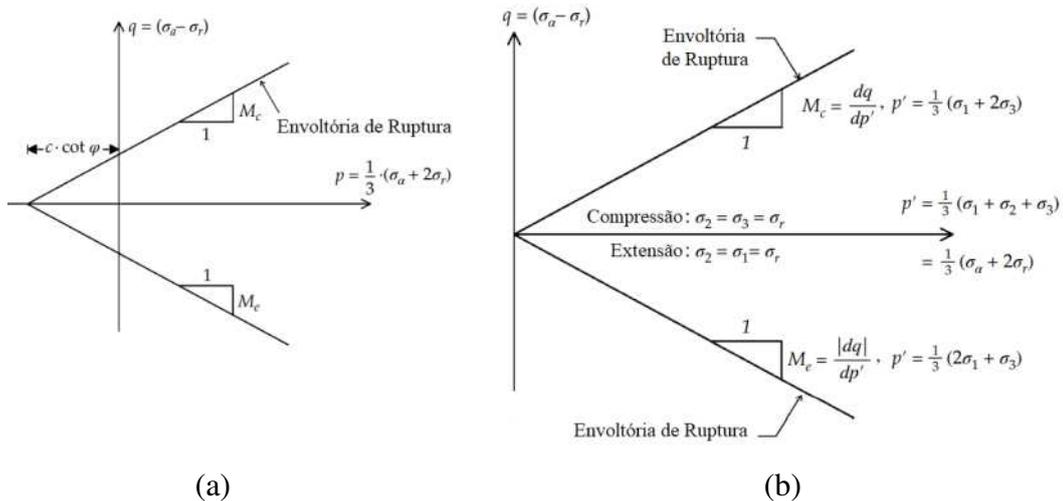


Figura 3. 16: Diagrama  $p'$  x  $q$  de Cambridge para (a) solo coesivo e (b) solo não coesivo.

Fonte: Hoch (2022)

Com os invariantes de tensões  $p'$  e  $q$  determinam-se as inclinações das envoltórias de ruptura ( $M$ ), e a partir do  $M$  determina-se os, ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) e o intercepto coesivo efetivo ( $c'$ ), por meio das equações 3.6 e 3.7.

$$\phi' = \sin^{-1} \times \left( \frac{3 \times M}{6 + M} \right) \quad (3.6)$$

$$c' = \frac{q_{(para\ p'=0)}}{M \times \cot \phi'} \quad (3.7)$$

### 3.2.7 Análise de estabilidade das pilhas

A concepção do modelo de pilha de resíduo e as análises de estabilidade foram feitas a luz da ABNT NBR 13.028 (2017), ABNT NBR 13.029 (2017) e ANCOLD (2019). As análises de estabilidade das pilhas, foram desenvolvidas por meio do software Slide 2 da Rocscience, empregando os métodos de cálculos rigorosos como o método de Spencer e o de Morgenstern-Price, ambos considerando superfícies potenciais de ruptura não-circulares por se tratar de uma análise em seções heterogêneas. Foram desenvolvidas análises em condições estáticas de solicitação, bem como condições de solicitações sísmicas (pseudoestáticas).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO RESÍDUO DEPOSITADO NA ARB 6

O resíduo de bauxita utilizado nesse estudo foi coletado próxima dos pontos de lançamento da ARB 6. Nessa área de resíduo de bauxita a deposição é feita por meio do método de deposição hidráulica. Assim como citado no item 2.2.3 esse método de deposição resulta na formação de uma zona de praia de resíduo acima da água e numa zona de lama associada à água de decantação da lagoa. A separação hidráulica provoca o depósito de partículas mais grossas e densas nas proximidades dos pontos de lançamento. Esse fenômeno é percebido por meio das análises de granulometria e do peso específico dos grãos.

Nas próximas seções as diferentes amostras serão catalogadas de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4. 1: Identificação das amostras

Profundidade	Região			
	Norte	Sul	Leste	Oeste
- 0,5 m	Norte – 0,5m	Sul – 0,5m	Leste – 0,5m	Oeste – 0,5m
- 1,0 m	Norte – 1,0m	Sul – 1,0m	Leste – 1,0m	Oeste – 1,0m

Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.1 Peso específico real dos grãos

Com base na Figura 4.1 nota-se que existe uma variabilidade tanto regional como em profundidade.

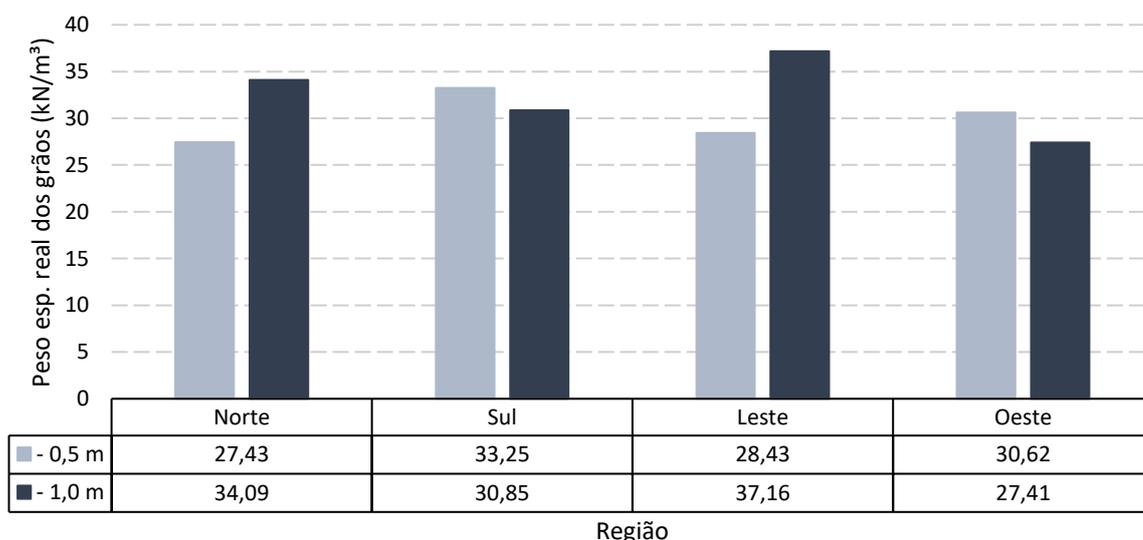


Figura 4. 1: Variabilidade o peso específico real dos grãos por região e profundidade.

Fonte: Autor (2024)

Na região Norte e Leste as variações são foram mais acentuadas com a profundidade, em torno de 19,54% e 23,49% respectivamente. As menores variabilidades foram percebidas nas regiões Oeste e Sul, por volta de 10,48% e 7,22% respectivamente.

Apesar da variabilidade, os valores de peso específico real dos grãos encontrados em cada região se enquadram entre os valores encontrados na literatura para o resíduo de bauxita. Na Tabela 4.2 constam alguns valores de peso específico real dos grãos de resíduo de bauxita determinados por outros autores para fins comparativos.

Tabela 4. 2: Peso específico real dos grãos de resíduo de bauxita

País	Processo de extração	Peso específico real dos grãos	Autores
Brasil	Bayer	31,5kN/m <sup>3</sup>	Bruschi <i>et al.</i> (2021)
Brasil	----	26,1kN/m <sup>3</sup>	Lima <i>et al.</i> (2020)
Brasil	Bayer	30,0 kN/m <sup>3</sup>	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	31,5 kN/m <sup>3</sup>	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	30,6 kN/m <sup>3</sup>	Nierwinski (2019)
Brasil	Bayer	30,1 kN/m <sup>3</sup>	Gonçalves (2021)
Índia	Bayer	33,3 kN/m <sup>3</sup>	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	32,7 kN/m <sup>3</sup>	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	33,4 kN/m <sup>3</sup>	Rout <i>et al.</i> (2013)
UK	Bayer	30,5 kN/m <sup>3</sup>	Newson <i>et al.</i> (2006)
Australia	Bayer	30,3 kN/m <sup>3</sup>	Jitsongiam (2007)
Guiné	Bayer	36,5 kN/m <sup>3</sup>	Gore (2015)
Guiné	Bayer	34,7 kN/m <sup>3</sup>	Gore (2015)
China	Sinterização	25,5kN/m <sup>3</sup>	Zhang <i>et al.</i> (2018)
China	Bayer	28,5kN/m <sup>3</sup>	Zhang <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.2 Distribuição de granulometria

Com base na análise granulométrica, torna-se evidente a ampla variabilidade espacial. Essa constatação é notável ao examinar a Figura 4.2, a qual representa de maneira clara as curvas granulométricas do resíduo para cada região e profundidade em questão.

Pelas curvas percebe-se que entre as regiões, a Leste apresenta maior variabilidade em comparação às demais. Tanto os materiais mais grossos e o mais fino foram coletados nessa região, mostrando o quão acentuado foi o efeito da profundidade na granulometria do material. Nas regiões Norte e Oeste também foram percebidas variabilidades na granulometria, contudo, menos acentuada. A região Sul diferente das demais apresentou baixíssima variabilidade granulométrica, mostrando que de 0 a 1 m de profundidade o resíduo permanece praticamente homogêneo. Na Tabela 4.3 consta a distribuição granulométrica do resíduo de bauxita das regiões Norte, Sul, Leste e Oeste.

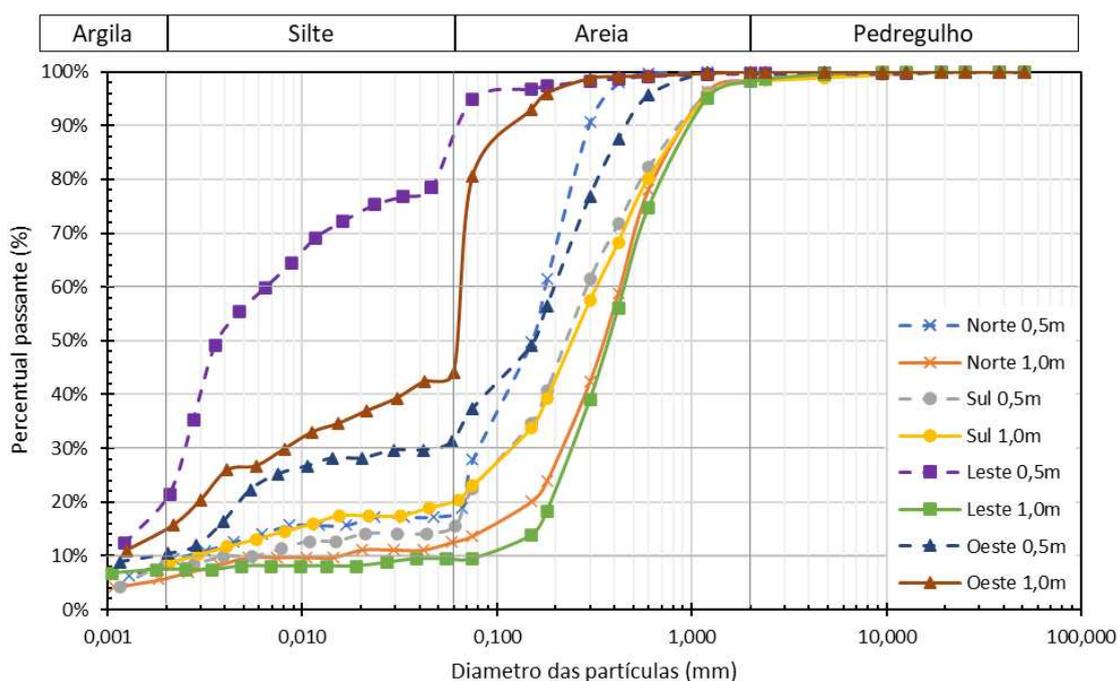


Figura 4. 2: Curvas granulométricas de resíduo de bauxita de diferentes regiões e profundidades.

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4. 3: Granulometria do resíduo de bauxita de diferentes regiões

Amostra	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	CU	CC	Composição					
						Argila	Silte	Areia fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
Norte - 0,5 m	0,0022	0,08	0,18	81,82	16,16	9,43%	8,57%	50,00%	31,80%	0,12%	0,08%
Norte - 1,0 m	0,0144	0,022	0,42	29,17	8,00	5,57%	6,96%	14,48%	51,14%	20,20%	1,66%
Sul - 0,5 m	0,006	0,13	0,29	48,33	9,71	8,46%	7,05%	29,48%	37,28%	16,34%	1,37%
Sul - 1,0 m	0,003	0,13	0,33	110,00	17,07	8,74%	11,65%	22,61%	37,29%	17,90%	1,81%
Leste - 0,5 m	0,001	0,0026	0,0064	6,40	1,056	21,51%	66,49%	9,50%	1,68%	0,44%	0,38%
Leste - 1,0 m	0,085	0,24	0,45	5,29	1,506	7,39%	2,01%	13,60%	51,83%	23,35%	1,82%
Oeste - 0,5 m	0,002	0,05	0,2	100,00	6,250	10,40%	20,79%	28,81%	35,64%	4,36%	0,00%
Oeste - 1,0 m	0,001	0,008	0,065	65,00	0,985	15,74%	28,32%	52,94%	2,24%	0,72%	0,04%

Fonte: Autor (2024)

Com base na Tabela 4.3, percebe-se que todas as amostras, exceto Leste – 0,5m e Oeste – 1,0m, apresentam mais de 50% de areia, ou seja, menos de 50% de partículas com dimensões inferiores a 75  $\mu\text{m}$ . Conforme mencionado por autores como Jitsongiam (2006), Xu *et al.* (2019) e Ding *et al.* (2021), resíduos de bauxita com essa característica são classificados como areia vermelha ou *red sand*, devido à presença de uma maior percentagem de partículas grosseiras com dimensões superiores a 150  $\mu\text{m}$ . Entretanto, as amostras Leste – 0,5m e Oeste – 1,0m, devido ao fato de apresentarem 94,84% e 80,70% de partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ , respectivamente, são designadas como lama vermelha ou *red mud*.

### 4.1.3 Limite de consistência (Limites de Atterberg)

Relativamente ao limite de consistência todas as amostras se mostraram ser não líquidas e não plásticas. Entretanto na literatura conforme apresentado na Tabela 4.4, há registro de que o resíduo apresenta um limite de liquidez em torno de 30 a 60 e um limite de plasticidade de 25 a 40. O índice de plasticidade para o resíduo de bauxita se resume a valores entre 5 e 26. De acordo com Gore (2015), o resíduo pode apresentar variações nos limites de consistência dependendo do método de secagem submetidos. O resíduo seco em estufa se mostrou ser não plástico. Entretanto, o resíduo seco por compressão e ao ar atingiram um índice de plasticidade (IP) igual a 26 e 11, respectivamente.

A submissão prévia do resíduo à secagem em estufa antes de realizar o ensaio de limite de Atterberg pode ser uma justificativa para o material ter demonstrado ser não plástico. Adicionalmente, materiais com granulometria mais grosseira tendem a exibir um comportamento não plástico.

Tabela 4. 4: Limite de consistência apresentadas por resíduo de bauxita

País	Processo de extração	LL	LP	IP	Autores
<b>Brasil</b>	<b>Bayer</b>	<b>N/L</b>	<b>N/P</b>	<b>N/P</b>	<b>Presente estudo</b>
Brasil	Bayer	37	33	4	Bruschi <i>et al.</i> (2021)
Brasil	Bayer	30,8	25,7	5,1	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	38,9	24,9	14	Bedin <i>et al.</i> (2010)
Brasil	Bayer	38	35	3	Nierwinski (2019)
Brasil	Bayer	23	32	9	Gonçalves (2021)
Índia	Bayer	---	---	---	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	---	---	---	Alam <i>et al.</i> (2019)
Índia	Bayer	24,75	17,5	7,25	Rout <i>et al.</i> (2013)
UK	Bayer	54	40	14	Newson <i>et al.</i> (2006)
Australia	Bayer	<25	N/P	N/P	Jitsongiam (2007)
Guiné	Bayer	62	36	26	Gore (2015)
Guiné	Bayer	47	35	12	Gore (2015)

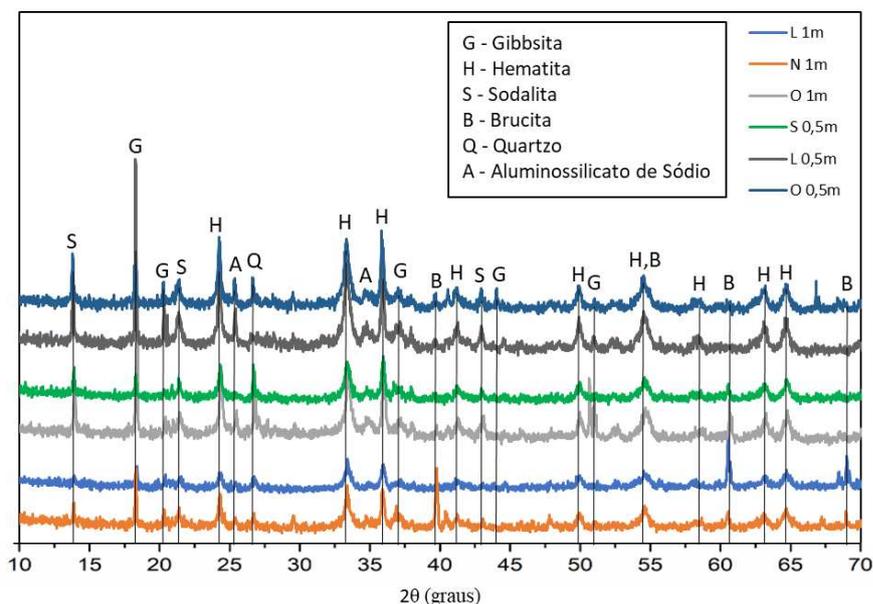
Fonte: Autor (2024)

### 4.1.4 Difractometria de raios-X (DRX)

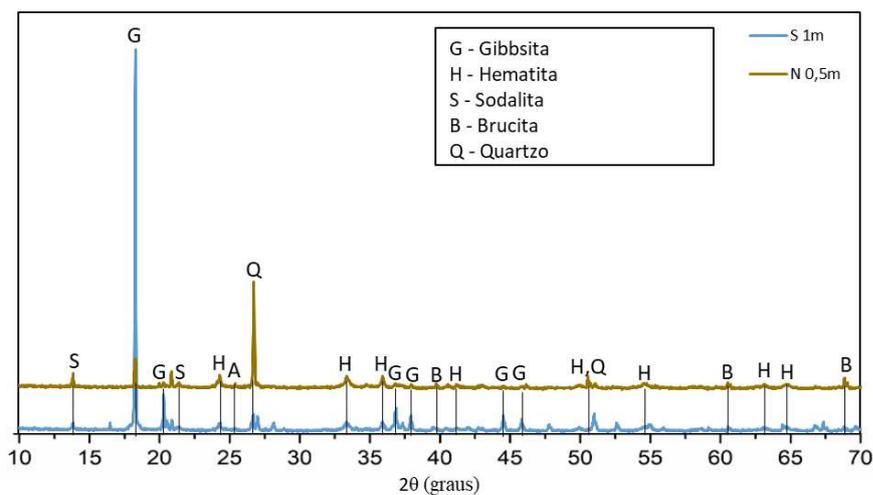
Ao analisar os padrões de DRX obtidos para os resíduos de bauxita das diversas regiões e profundidades, mostra-se que não há diferenças substanciais entre os materiais (Figura 4.3). Os dados de intensidade em ambos os gráficos de DRX foram ajustados para facilitar a visualização dos conjuntos de dados individuais e a comparação dos picos correspondentes a cada componente. As linhas verticais pretas unem os pontos de pico de cada componente identificado em cada uma das amostras. Informações mais detalhadas das DRX encontram-se presente nos gráficos de padrão de difração no Anexo A.

Os padrões de DRX das amostras Sul – 1,0m, e Norte – 0,5m, foram representados na Figura 4.3 (b), isolados dos demais, devido à presença de picos notavelmente elevados de Gibbsita (intensidade = 9122) e Quartzo (intensidade = 2619), respectivamente. Esses picos

destoantes justificaram a representação separada para uma melhor apreciação das características específicas de cada materiais.



(a)



(b)

Figura 4. 3: Comparação dos resultados da DRX das amostras de resíduos de bauxita: (a) exceto Sul – 1,0m e Norte – 0,5m; (b) Sul – 1,0m e Norte – 0,5m

Fonte: Autor (2024)

Apesar das variações de intensidade, as amostras apresentam praticamente o mesmo padrão. De modo geral, as principais fases mineralógicas identificadas no resíduo de bauxita foram Gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Sodalita ( $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e alguns Aluminossilicatos. A presença de hematita (um tipo de minério de ferro) justifica o elevado peso específico real dos grãos. Existe a possibilidade da Sodalita ser produto da geopolimerização do resíduo com o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) residual do processo de

Bayer, considerando que o material ficou imerso por anos em um líquido enriquecido em NaOH. Esse ambiente alcalino, combinado com a interação prolongada do resíduo, pode ter promovido reações químicas, resultando na formação da Sodalita como produto da geopolimerização. No entanto, seria necessário realizar análises mais aprofundadas e experimentos específicos para confirmar essa hipótese.

Em suma, com base nas análises das características físicas, observou-se que os resíduos depositados exibem uma variabilidade significativa tanto em superfície quanto em profundidade, com exceção das amostras Sul – 0,5m e Sul 1,0m, que apresentaram variações mínimas entre si. Embora esses materiais estejam sujeitos aos mesmos processos industriais, a deposição ocorre de maneira a resultar em segregação hidráulica. Conseqüentemente, partículas mais grossas e pesadas se separam das demais, depositando-se na região próxima aos pontos de lançamento (*red sand*), enquanto as partículas mais finas e leves seguem o fluxo hidráulico, acabando por se depositar em pontos mais distantes (*red mud*). Ficou evidente a variação do material com a profundidade, contudo, não foi identificado um padrão consistente entre as diferentes regiões. No que diz respeito à mineralogia, os resíduos de bauxita analisados não apresentam grandes variações entre si.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA ESTUDADO

Após a análise da variabilidade espacial dos resíduos, foram definidas as amostras da região Sul como objeto de estudo, uma vez que apresentaram variabilidades mínimas entre si. Como o objeto de estudo definido foi dada sequência com os demais ensaios de caracterização física, química e ambiental. As análises do comportamento mecânico também foram desenvolvidas sobre as amostras da região Sul.

Parte da caracterização das amostras de resíduo da região sul foi apresentada no item 4.1 juntamente com as amostras das demais regiões e na Tabela 4.5 consta o resumo das propriedades do material.

Tabela 4. 5: Resumo das propriedades físicas e químicas do resíduo bauxita

Propriedades Físicas		
Amostras	Sul – 0,5m	Sul – 1,0 m
Peso específico real dos grãos	33,25 kN/m <sup>3</sup>	30,85 kN/m <sup>3</sup>
Pedregulho (2 < d < 60 mm)	1,37%	1,81%
Areia grossa (0,6 < d < 2,0 mm)	16,34%	17,90%
Areia média (0,2 < d < 0,6 mm)	37,28%	37,29%
Areia fina (0,06 < d < 0,2 mm)	29,48%	22,61%
Silte (0,002 < d < 0,06 mm)	7,05%	11,65%
Argila (d ≤ 0,002 mm)	8,46%	8,74%
D <sub>60</sub>	0,29	0,33
D <sub>30</sub>	0,13	0,13
D <sub>10</sub>	0,006	0,003
CU	48,33	110,00
CC	9,71	17,07
Limite de liquidez	N/L	N/L
Limite de plasticidade	N/P	N/P
Índice de plasticidade	N/P	N/P
Classificação SUCS	SM	SM
Propriedades Químicas		
Amostras	Sul - 0,5m	Sul - 1,0 m
pH	10,46	10,71
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	4,9	4,9
Na <sub>2</sub> O (%)	28,52	17,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	23,87	19,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	22,88	32,63
SiO <sub>2</sub> (%)	10,84	9,16
TiO <sub>2</sub> (%)	1,83	1,49
ZrO <sub>2</sub> (%)	0,41	0,48
Outros (%)	0,53	0,53
Perda ao fogo (%)	11,12	18,63

Fonte: Autor (2024)

Nota-se pela granulometria que as mostras Sul - 0,5 m e Sul - 1,0 m apresentam um percentual significativo de material grosso (55% e 57% de partículas maiores 200 µm respectivamente) e entre esse percentual de fração grossa consta 1,37% e 1,81% de pedregulhos para Sul - 0,5 m e Sul - 1,0 m, respectivamente. Com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o resíduo foi classificado com areia siltosa.

Sabendo que o resíduo é resultado do processo de beneficiamento espera-se uma granulometria mais fina, contudo sabendo que o material foi coletado na região de praia (extremidades da ARB 6) e como base na explicação apresentada no item 2.2.3, é normal a presença de frações mais grossas na amostra. Existe também a possibilidade desses materiais mais grosseiros (Figura 4.4) serem resultados da cimentação do resíduo ao longo do tempo, promovido pela sua interação com hidróxido de sódio (NaOH) num ambiente alcalino. A ocorrência dessa cimentação no resíduo de bauxita foi confirmada por Pinnock (1992), Newson *et al.* (2006) e Gore (2015). Gore (2015) cita que na instalação perto de East Saint Louis, foram verificadas com camadas de resíduo de bauxita endurecido que eram difíceis de penetrar usando os equipamentos SPT e penetração de cone.



Figura 4. 4: Fração grossa do resíduo de bauxita  
 Fonte: Autor (2024)

Com base nos resultados de FRX apresentados na Tabela 4.4 nota-se que o resíduo apresenta quantidades substanciais de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na sua composição. Essa composição química, atrelada ao fato de que material esteve imerso em um líquido rico em hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) por anos, realça ainda mais a hipótese de que o material mais grosseiro foi resultado da cimentação in loco, promovido por meio da ativação alcalina. Nesse sentido seria interessante o desenvolvimento de estudos voltados para essa capacidade cimentícia do resíduo de bauxita. Percebe-se também com os resultados de FRX, que o resíduo apresenta percentual considerável de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Isto justifica o alto peso específico real dos grãos encontrado.

#### 4.2.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi desenvolvido para a mistura homogênea das amostra Sul – 0,5m e Sul – 1,0m, na energia Proctor normal e o resultado consta na Tabela 4.6 e Figura 4.5.

Tabela 4. 6: Resultados do ensaio de compactação na energia Proctor normal

Energia	Peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ )	Teor de umidade ótimo (%)
Normal	19,9	17,76

Fonte: Autor (2024)

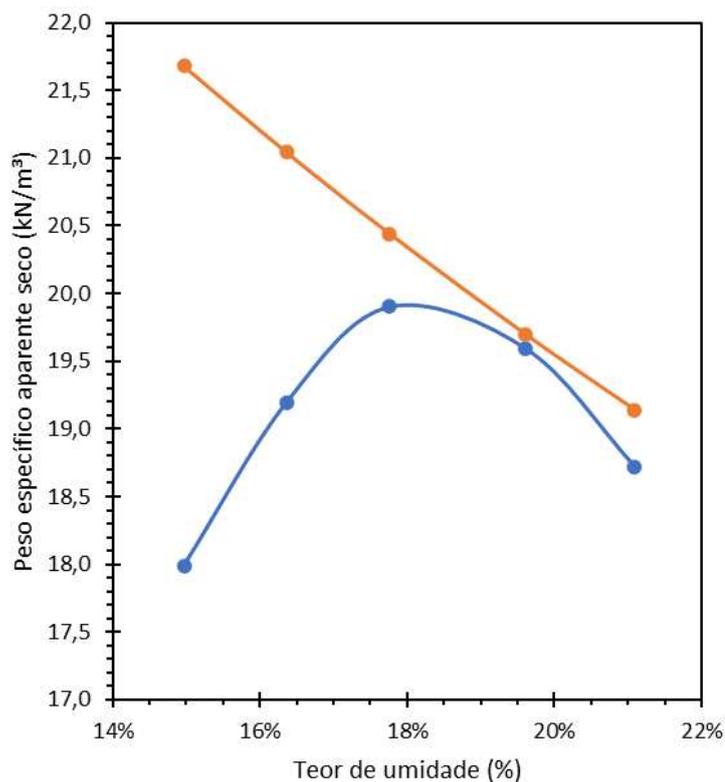


Figura 4. 5: Curva de compactação na energia Proctor normal  
Fonte: Autor (2024)

Comparando com os resultados apresentados na Tabela 2.3 do item 2.2.3, nota-se que a amostra estudada apresenta um teor de umidade ótimo próximo dos valores encontrados por Rout *et al.* (2013), Jitsongiam (2007) e Gonçalves (2021), contudo esse valor foi inferior aos registrados pelos demais autores. Esse teor de umidade baixo pode ser explicado pelo fato da amostra apresentar um alto percentual de partículas arenosas (maior que 80%). Sendo assim necessita de menor quantidade de água para atingir o ponto ótimo que as amostras de granulometria mais finas. O alto percentual de partículas mais grossas também justifica o alto peso específico seco ótimo exibido pela amostra estudada. O valor exibido pela amostra é ligeiramente superior ao valor encontrado por Rout *et al.* (2013).

#### 4.2.2 Análise do lixiviado e solubilizado

A caracterização do lixiviado e do solubilizado do resíduo de bauxita consta na Tabela 4.8 e 4.9, respectivamente.

Tabela 4. 7: Análise do lixiviado do resíduo de bauxita

Elemento	Contido no lixiviado (mg/l)	Limite normativo (mg/l)	
		ABNT NBR 10004 (2004)	CONAMA 460
Alumínio (Al)	<b>7,602</b>	---	3,50
Prata (Ag)	< 0,01	5,0	0,05
Arsênio (As)	< 0,01	1,0	0,01
Bário (Ba)	< 0,03	70,0	0,70
Cádmio (Cd)	< 0,001	0,5	0,005
Cromo (Cr)	< 0,03	5,0	0,05
Cobre (Cu)	< 0,008	---	2,00
Ferro (Fe)	0,5759	---	2,45
Mercúrio (Hg)	< 0,001	0,1	0,001
Manganês (Mn)	0,09487	---	0,40
Chumbo (Pb)	< 0,01	1,0	0,01
Selênio (Se)	< 0,01	1,0	0,01
Zinco (Zn)	0,07419	---	1,05

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4. 8: Análise do solubilizado do resíduo de bauxita

Elemento	Contido no solubilizado (mg/l)	Limite normativo (mg/l)	
		ABNT NBR 10004 (2004)	CONAMA 460
Alumínio (Al)	<b>12,27</b>	0,2	3,50
Prata (Ag)	< 0,01	0,05	0,05
Arsênio (As)	< 0,01	0,01	0,01
Bário (Ba)	< 0,03	0,7	0,70
Cádmio (Cd)	< 0,001	0,005	0,005
Cromo (Cr)	<b>0,2549</b>	0,05	0,05
Cobre (Cu)	< 0,008	2,0	2,00
Ferro (Fe)	<b>1,775</b>	0,3	2,45
Mercúrio (Hg)	< 0,001	0,001	0,001
Manganês (Mn)	< 0,02	0,1	0,40
Sódio (Na)	191,4	200,0	---
Chumbo (Pb)	< 0,01	0,01	0,01
Selênio (Se)	< 0,01	0,01	0,01
Zinco (Zn)	< 0,04	5	1,05
Cloreto (Cl)	---	250	---
Surfactantes	---	0,5	---

Fonte: Autor (2024)

Ao avaliar as concentrações do extrato lixiviado, e comparando com os limites normativos expostos pela ABNT NBR 10.004 (2004a) percebe-se que todos os elementos encontram-se dentro do permitido. No entanto, para a normativa do CONAMA o a concentração de alumínio (Al) encontra-se acima do recomendado. O resultado da análise do extrato solubilizado revelou que os elementos: alumínio (Al), cromo (Cr), e ferro (Fe) ultrapassaram os limites estipulados pela ABNT NBR 10.004 (2004a). Entretanto, com base nos limites estabelecidos pela CONAMA o a concentração de ferro (Fe) encontra-se dentro do recomendado.

Os extratos lixiviado do resíduo de bauxita estudado por Bruschi *et al.* (2023) também ficaram todos abaixo do limite máximo estabelecidos pela ABNT NBR 10.004 (2004a). Entretanto, os extratos solubilizados foram superiores aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 10.004 (2004a), para prata (Ag), alumínio (Al), arsênico (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), mercúrio (Hg), sódio (Na), chumbo (Pb) e selênio (Se).

O resíduo de bauxita foi classificado como resíduos classe II A – não perigoso e não inertes, coincidindo com a classificação efetuado por Bruschi *et al.* (2022). Os resíduos classificados como resíduos classe II A, são os aqueles que não se apresentam como inflamáveis, corrosivos, tóxicos, patogênicos, e nem possuem tendência a sofrer uma reação química. Entretanto, os materiais desta classe podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

#### 4.3 ANÁLISE DO ENCAPSULAMENTO DE METAIS

Resíduos mineiros têm o potencial de libertação de contaminantes perigosos. O resíduo de bauxita apresenta alto potencial para lixiviação de contaminantes segundo Ghosh *et al.* (2011). Para reduzir a lixiviação de metais e promover a valorização de resíduos, técnicas de solidificação/estabilização têm sido aplicadas aos resíduos de mineração conforme Bruschi *et al.* (2023). Entre as técnicas destaca-se a adição de cimento que proporciona uma barreira mecânica dentro da matriz cimentícia, reduzindo a permeabilidade e impedindo a lixiviação de contaminantes, evitando sua liberação no meio ambiente (Fante, 2023). Em diversos estudos da literatura, o tratamento com cimento Portland tem se mostrado eficaz na redução da lixiviação de solos contaminados com elementos como As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag e Zn (Hosseini, 2000; Marques; Rangel; Castro, 2011), assim como na imobilização de elementos tóxicos (Zhang *et al.*, 2021).

Conforme destacado no item 4.2.3, o resíduo puro (com 0% de cimento) apresentou, no extrato de lixiviado, apenas concentração elevada de alumínio (Al), ultrapassando os limites estabelecidos pela CONAMA 460. No entanto, os demais elementos presentes no extrato exibiram concentrações inferiores aos limites estabelecidos pela CONAMA 460 e ABNT NBR 10.004 (2004a). As análises dos extratos de lixiviado do resíduo com 2% e 6% de cimento mostraram que a adição de cimento Portland resulta na redução da concentração de manganês (Mn) (Figura 4.7(a)). Contudo, a adição do cimento não foi eficiente no encapsulamento do alumínio (Al). Ressalta-se que o cimento convencional é majoritariamente composto por aluminatos, contribuindo para o aumento da concentração de Alumínio (Al) nas misturas (Bruschi *et al.* (2022). Houve um ligeiro aumento da concentração de zinco (Zn) com o aumento

do teor de cimento, mas é importante salientar que esse aumento foi insuficiente para ultrapassar os limites estabelecidos pela ABNT NBR 10.004 (2004a) e CONAMA 460 (Figura 4.7(b)).

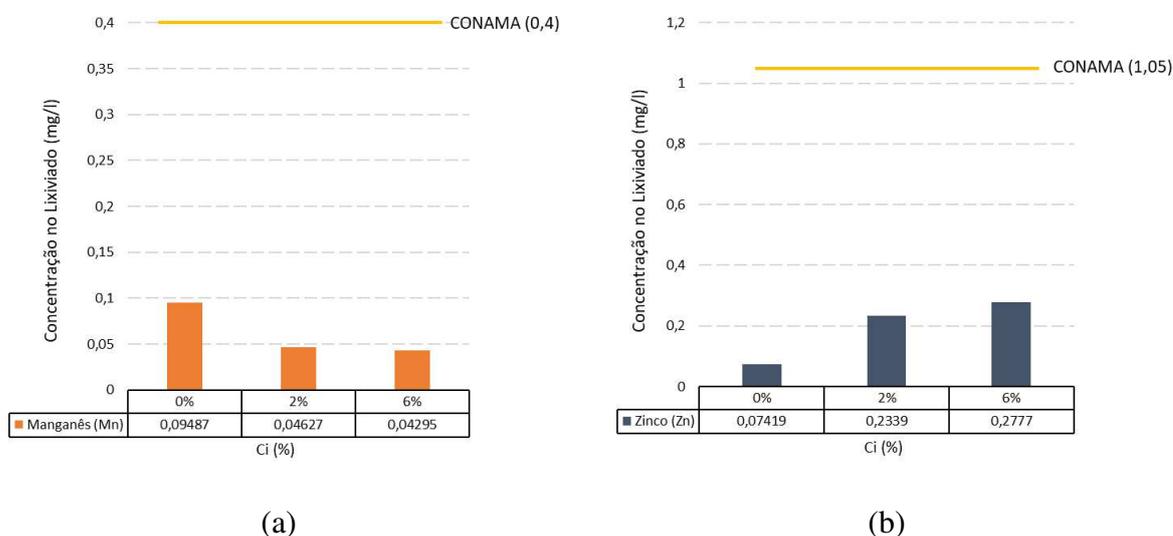


Figura 4. 6: Concentração de: (a) manganês no extrato de lixiviado com 0%, 2% e 6%; (b) concentração de zinco extrato de lixiviado com 0%, 2% e 6%

Fonte: Autor (2024)

No item 4.2.3, o resíduo puro (com 0% de cimento) apresentou, no extrato de solubilizado, elementos como alumínio (Al), cromo (Cr), e ferro (Fe), com concentrações superiores aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004) e CONAMA 460. Ao analisar os resultados das análises dos extratos solubilizados do resíduo com 2% e 6% de cimento, nota-se que a adição de cimento Portland foi eficaz no encapsulamento de metais como ferro (Fe) e cromo (Cr), reduzindo a concentração desses elementos no extrato solubilizado. É perceptível o aumento da capacidade de encapsulamento de ferro com o aumento do teor de cimento. A concentração de ferro reduziu em 88,63% (de 1,775 mg/l para 0,2019 mg/l) ao adicionar 2% de cimento ao resíduo. A adição de 6% de cimento resultou em uma redução de 95,36% (de 1,775 mg/l para 0,08243 mg/l).

No caso do cromo, a adição de 2% e 6% de cimento resulta no encapsulamento desse elemento, reduzindo a sua concentração no extrato solubilizado de 0,2549 mg/l para valores inferiores a 0,03 mg/l. Isto confirma a eficiência do cimento Portland no encapsulamento de cromo (Cr), assim como comprovado por Barreto (2023). É importante ressaltar que ambas as concentrações de cromo (Cr) e de ferro (Fe) reduziram para valores inferiores aos limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004) e CONAMA 460 (Figura 4.8).

A concentração de alumínio (Al) aumentou com a adição de cimento. Como o cimento convencional é majoritariamente composto por aluminatos, a sua adição pode ter contribuição no aumento da concentração de Al nas misturas (Bruschi *et al.*, 2022).

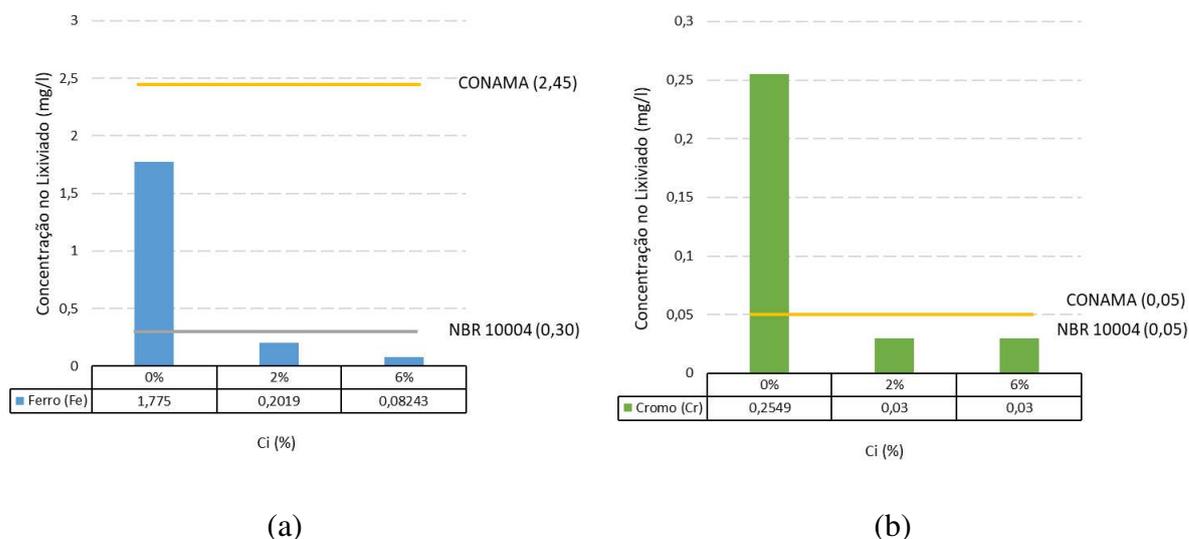


Figura 4. 7: Concentração de: (a) ferro no extrato de solubilizado com 0%, 2% e 6%; (b) concentração de cromo no extrato de solubilizado com 0%, 2% e 6%

Fonte: Autor (2024)

Em resumo, as misturas de resíduo de bauxita com cimento demonstraram um comportamento satisfatório nos ensaios de lixiviação e solubilização. A análise dos extratos de lixiviado revelou o encapsulamento eficiente de manganês (Mn) pela matriz cimentícia. Adicionalmente, nos extratos de solubilizado das misturas do resíduo com cimento Portland, observou-se um eficiente encapsulamento dos metais cromo (Cr) e ferro (Fe), resultando em concentrações inferiores aos limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004) e CONAMA 460. Contudo, tanto os extratos de lixiviado quanto os extratos de solubilizado apresentaram concentrações de alumínio (Al) que excederam os limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 10004 (2004) e CONAMA 460.

#### 4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

No Anexo B, na Tabela B.1, estão apresentadas as características dos corpos de prova (CP's) submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS) após 7 dias de cura, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental exibido no item 3.2.2. Todos os CP's foram moldados na umidade ótima de 18% como o teor de cimento variando em 2%, 4% e 6%, e o peso específico aparente seco variando em 18 kN/m<sup>3</sup>, 19 kN/m<sup>3</sup> e 20 kN/m<sup>3</sup>.

##### 4.4.1 Efeito do teor de cimento

Na Figura 4.9 consta a resistência à compressão simples (RSC) em função do teor de cimento. Percebe-se, que o teor de cimento teve um efeito positivo sobre a RSC do material. Pequenas quantidades de cimento se mostraram suficientes para produzir aumentos

significativos de resistências. Variando o teor de cimento de 2% para 4%, a RCS, para peso específico aparente seco de 18 kPa/m<sup>3</sup>, 19 kPa/m<sup>3</sup> e 20 kPa/m<sup>3</sup>, tem-se um aumento de 971,25 kPa para 2482,25 kPa (2,56 vezes), 1361,70 kPa para 3554,30 kPa (2,61 vezes) e 1766,80 kPa para 4748,60 kPa (2,69 vezes) respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 2,62 vezes em relação ao valor inicial de 2% de teor de cimento. Variando o teor de cimento de 2% a 6%, a RCS, para peso específico aparente seco de 18 kPa/m<sup>3</sup>, 19 kPa/m<sup>3</sup> e 20 kPa/m<sup>3</sup>, tem-se um aumento de 971,25 kPa para 3993,25 kPa (4,11 vezes), 1361,70 kPa para 5746,90 kPa (4,22 vezes) e 1766,80 kPa para 7730,40 kPa (4,38 vezes) respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 4,24 vezes em relação ao valor inicial de 2% de teor de cimento. O aumento no valor da resistência é atribuído às ligações físicas do resíduo de bauxita com o cimento Portland que ocorrem durante o período de cura. De acordo com Horpibulsuk *et al.* (2010), o aumento do teor de cimento resulta em uma maior formação da matriz cimentícia entre as partículas, promovendo ganhos substanciais de resistência. Isso é válido apenas para teores baixos de cimento, variando de 0 a 11%. A RCS se mostrou ser diretamente proporcional ao teor de cimento e essa relação pode ser representada por uma função linear de tendência.

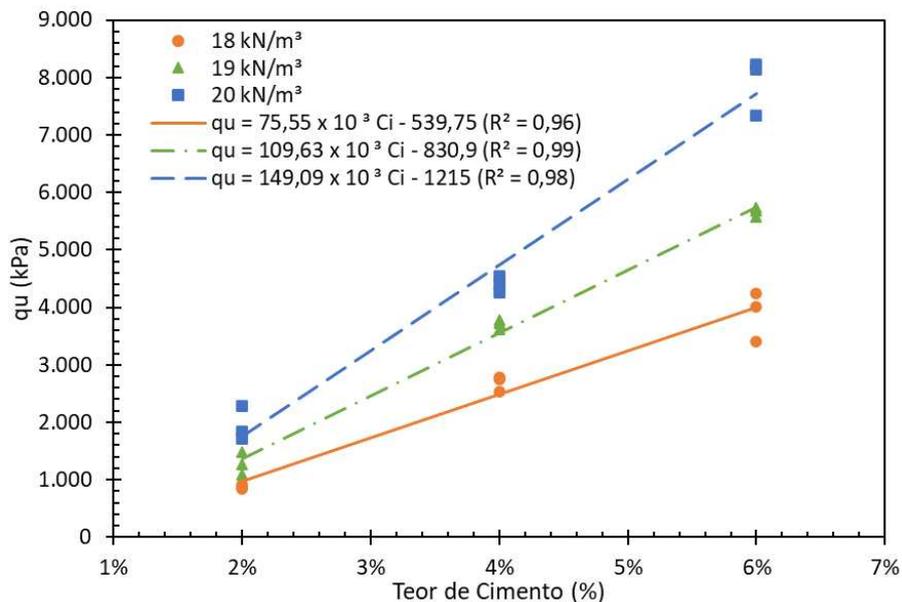


Figura 4. 8: Resistências à compressão simples ( $q_u$ ) em função do teor de cimento ( $C_i$ ).

Fonte: Autor (2024)

Nota-se também que o peso específico aparente seco influencia no comportamento do geomaterial, contribuindo positivamente no aumento da resistência. É perceptível a alteração da inclinação das retas de tendência, tornando-se mais acentuadas para pesos específicos aparente seco maiores. Esse comportamento, segundo Consoli *et al.* (2023a), se deve ao fato de

que um maior peso específico reflete em um menor número de vazios, ou seja, proporciona um maior contato entre os grãos e uma melhor formação de matriz cimentícia.

Comportamentos similares a este são descritos na literatura por pesquisadores que relatam a influência destes parâmetros no comportamento de geomateriais melhorados com agentes cimentantes (Consoli *et al.*, 2007, 2010, 2012, 2014, 2022, 2023; Moreira *et al.*, 2019; Bruschi *et al.*, 2022; Chaves *et al.*, 2023; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; entre outros).

#### 4.4.2 Efeito da porosidade

A porosidade se mostrou ser inversamente proporcional à resistência a compressão simples (RCS) e essa relação pode ser representada por uma função linear de tendência (Figura 4.10). Independentemente do teor de cimento empregado, uma diminuição na porosidade do material resulta num aumento significativo de resistência. Pois, a redução da porosidade resulta num maior intertravamento das partículas do material e de um maior número de contatos existentes nessas mesmas partículas, gerando assim uma maior capacidade de distribuição de tensões de atrito e normais no interior da amostra. Entretanto, se tratando de um material melhorado com cimento, a redução da porosidade influencia diretamente no desenvolvimento da matriz cimentícia. Pois, o aumento da densidade do meio proporciona um maior entrelaçamento entre as partículas do material, colaborando para um melhor desenvolvimento de uma matriz cimentícia devido ao aumento da área de contato entre os grãos (Consoli *et al.* 2012, 2023a, 2023b).

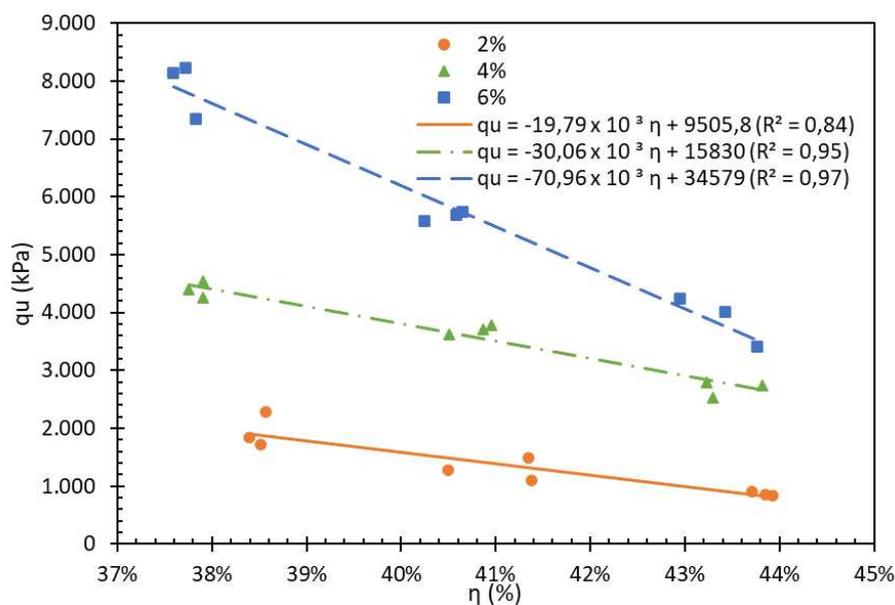


Figura 4. 9: Resistências à compressão simples ( $q_u$ ) em função da porosidade ( $\eta$ ).

Fonte: Autor (2024)

Reduzindo a porosidade em aproximadamente 3% (43,84% para 40,72%), a RCS, para teor de cimento de 2%, 4% e 6%, sofre um aumento de 829,43 kPa para 1446,86 kPa (1,74

vezes), 2649,29 kPa para 3587,25 kPa (1,35 vezes) e 3468,59 kPa para 5682,46 kPa (1,64 vezes) respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 1,58 vezes em relação à porosidade inicial. Reduzindo a porosidade em aproximadamente 6% (43,84% para 37,60%), a RCS, para teor de cimento de 2%, 4% e 6%, sofre um aumento de 829,43 kPa para 2064,28 kPa (2,49 vezes), 2649,29 kPa para 4525,21 kPa (1,71 vezes) e 3468,59 kPa para 7896,32 kPa (2,28 vezes) respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 2,16 vezes em relação á porosidade inicial.

Comportamentos similares a este são descritos na literatura por pesquisadores que relatam a influência destes parâmetros no comportamento de geomateriais melhorados com agentes cimentantes (Consoli *et al.*, 2007, 2010, 2012, 2014, 2022, 2023; Moreira *et al.*, 2019; Bruschi *et al.*, 2022; Chaves *et al.*, 2023; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; entre outros).

#### 4.4.3 Relação $\eta/C_{iv}$ para previsão de $q_u$

De acordo com o embasamento teórico apresentado no item 2.5.4, as resistências à compressão simples (RCS) e os índices porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) de cada corpo de prova, foram relacionadas através da função do tipo potência, conforme apresentado na Figura 4.11. O parâmetro  $\eta/C_{iv}$  se mostrou eficaz na previsão da RCS do resíduo de bauxita melhorado com cimento Portland, compreendendo toda a faixa de valores estudados, retornando um ( $R^2$ ) de 0,92. O gráfico demonstra que quanto maior o índice  $\eta/C_{iv}$ , menor é a resistência, assim como esperado.

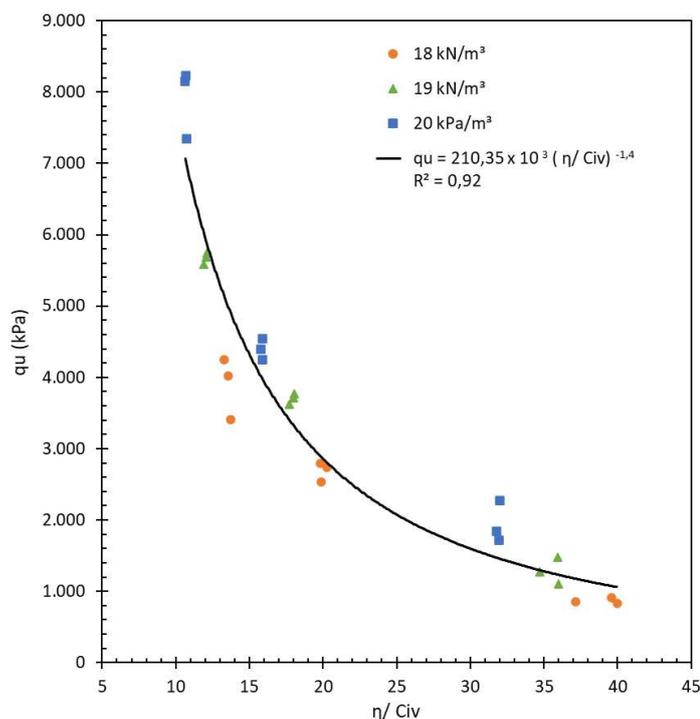


Figura 4. 10: Relação entre o parâmetro  $\eta/C_{iv}$  e a resistência à compressão simples ( $q_u$ )

Fonte: Autor (2024)

O expoente ( $k$ ) aplicado à parcela correspondente ao teor volumétrico de cimento, conforme apresentado na equação 2.1, é utilizado para compatibilizar as relações entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento. No caso do resíduo de bauxita estudado esse expoente, foi definido como 1. Valor de  $k$  equivalente a 1 tem sido usado em diversos estudos (Mafessoli, 2022; Consoli *et al.*, 2022, 2023; Chaves *et al.*, 2023) para correlacionar o desempenho mecânico, por meio do índice  $\eta/C_{iv}$ , de geomateriais de comportamento friccional quando cimentados artificialmente, constituídos principalmente por frações granulométricas arenosas (finas a grossas) e /ou com alto teor de finos não plásticos. Esse expoente é geralmente mais baixo para materiais mais finos. O coeficiente externo ( $B$ ) foi fixado em 1,40 tanto para os resultados da RCS como para os resultados da resistência a tração por compressão diametral (RTCD), com o intuito de equalizar e facilitar as análises. A equação 4.1 representa a curva potencial que relaciona a RCS ao valor de  $\eta/C_{iv}$ .

$$q_u = 210,35 \times 10^3 \times \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{-1,4}; R^2 = 0,92 \quad (4.1)$$

#### 4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

No Anexo B, na Tabela B.2, estão apresentadas as características dos corpos de prova (CP's) submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) após 7 dias de cura, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental exibido no item 3.2.2. Todos os CP's foram moldados na umidade ótima de 18% como o teor de cimento variando em 2%, 4% e 6%, e o peso específico aparente seco variando em 18 kN/m<sup>3</sup>, 19 kN/m<sup>3</sup> e 20 kN/m<sup>3</sup>. Aparte dos resultados apresentados nesse item, nota-se que as amostras ensaiadas exibem um comportamento semelhante ao que foi apresentado no item 4.4. Dessa forma é importante ressaltar que todos os argumentos apresentados nesse item são análogos aos do item 4.4.

##### 4.5.1 Efeito do teor de cimento

A Figura 4.12 apresenta a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) em relação ao teor de cimento. Observa-se que o teor de cimento exerceu um impacto positivo na RTCD do material. A adição de pequenas quantidades de cimento resultou em aumentos expressivos nas resistências. Ao variar o teor de cimento de 2% para 4%, para um peso específico aparente seco de 18 kPa/m<sup>3</sup>, 19 kPa/m<sup>3</sup> e 20 kPa/m<sup>3</sup>, a RTCD registrou um aumento de 128,91 kPa para 370,51 kPa (2,87 vezes), 206,60 kPa para 502,40 kPa (2,43 vezes) e 281,56 kPa para 676,16 kPa (2,40 vezes) respectivamente. Isso representa, em média, um aumento de aproximadamente 2,57 vezes em relação ao valor inicial de 2% de teor de cimento. O acréscimo na resistência, assim como explicado no item 4.4.1, é atribuído às interações físicas entre o

resíduo de bauxita e o cimento Portland, que ocorrem durante o período de cura. De acordo com Horpibulsuk *et al.* (2010), o aumento no teor de cimento resulta em uma maior formação da matriz cimentícia entre as partículas, promovendo ganhos substanciais de resistência. Essa relação é válida apenas para teores baixos de cimento, variando de 0 a 11%. A RTCD também mostrou ser diretamente proporcional ao teor de cimento e essa relação pode ser representada por uma função linear de tendência.

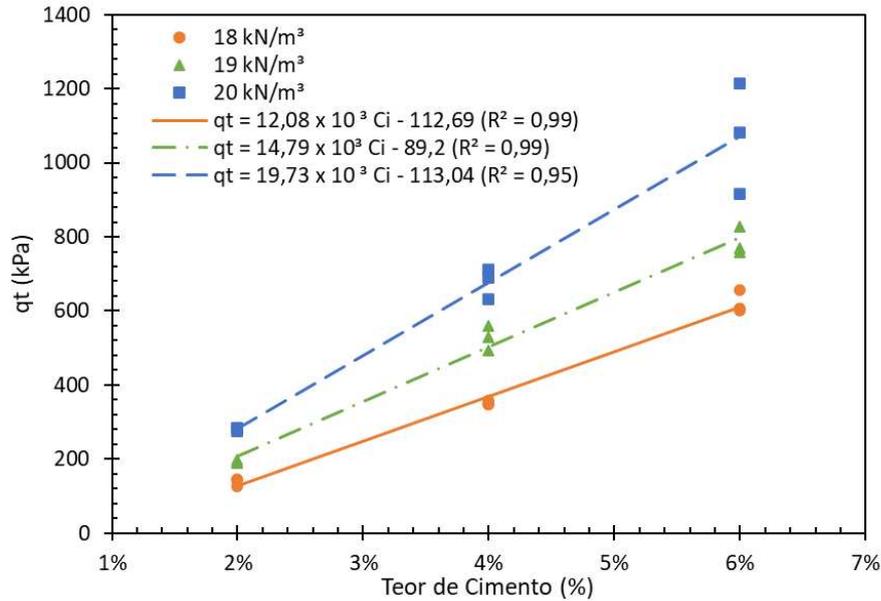


Figura 4. 11: Resistências à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) em função do teor de cimento ( $C_i$ ).

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que o peso específico aparente seco exerce uma influência significativa no comportamento do geomaterial, contribuindo positivamente para o aumento da resistência. É evidente a modificação na inclinação das retas de tendência, que se tornam mais pronunciadas em casos de pesos específicos aparente seco mais elevados. De acordo com Consoli *et al.* (2023a), esse padrão ocorre devido ao fato de que um maior peso específico resulta em um menor número de vazios, proporcionando assim um maior contato entre os grãos e uma formação mais eficiente de matriz cimentícia.

Comportamentos semelhantes a esse são descritos na literatura por diversos pesquisadores que destacam a influência desses parâmetros no comportamento de geomateriais aprimorados com agentes cimentantes (Consoli *et al.*, 2010, 2012, 2014, 2022; Bruschi, 2020; Mafessoli, 2022; Daronco, 2022; Chaves *et al.*, 2023; entre outros).

#### 4.5.2 Efeito da porosidade

Com base na Figura 4.13, observa-se que a porosidade é inversamente proporcional à resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e essa relação pode ser representada por uma função linear de tendência. Assim como citado no item 4.4.2, a redução da porosidade do

material resulta em um aumento significativo na resistência, independentemente do teor de cimento utilizado. A diminuição da porosidade contribui para um maior intertravamento das partículas do material e um aumento no número de contatos entre essas partículas, gerando assim uma maior capacidade de distribuição de tensões de atrito e normais no interior da amostra. Contudo, em casos de material melhorado com cimento, a redução da porosidade influencia diretamente no desenvolvimento da matriz cimentícia. O aumento da densidade do meio proporciona um maior intertravamento entre as partículas do material, colaborando para um melhor desenvolvimento da matriz cimentícia devido ao aumento da área de contato entre os grãos (Consoli *et al.*, 2012, 2023a, 2023b).

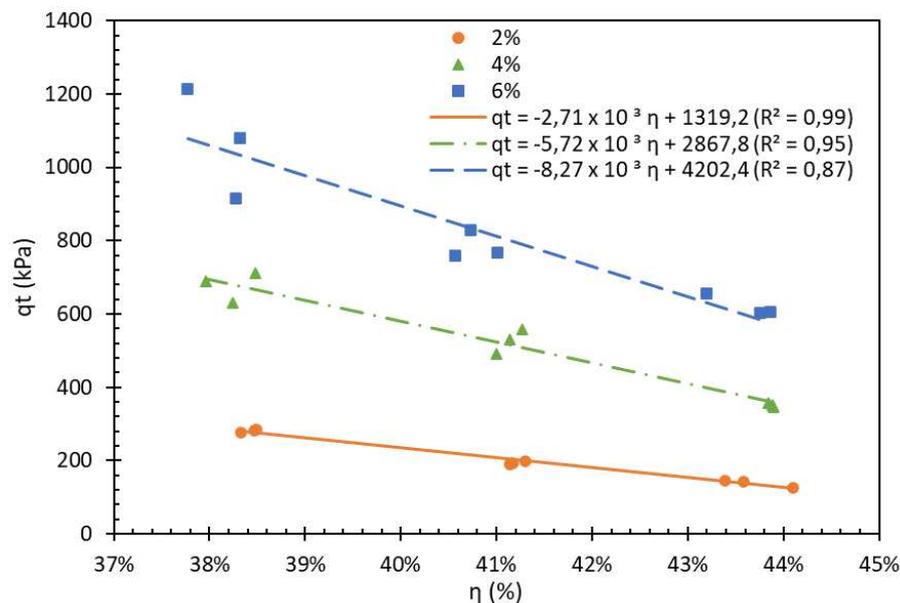


Figura 4. 12: Resistências à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) em função da porosidade ( $\eta$ ).

Fonte: Autor (2024)

Reduzindo a porosidade em aproximadamente 3% (43,84% para 40,72%), a RTCD, para teor de cimento de 2%, 4% e 6%, tem-se um aumento de 131,08 kPa para 215,63 kPa (1,65 vezes), 360,03 kPa para 538,48 kPa (1,50 vezes) e 576,65 kPa para 834,67 kPa (1,45 vezes) respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 1,53 vezes em relação à porosidade inicial. Reduzindo a porosidade em aproximadamente 6% (43,84% para 37,60%), a RTCD, para teor de cimento de 2%, 4% e 6%, tem-se um aumento de 131,08 kPa para 300,17 kPa (2,29 vezes), 360,03 kPa para 716,94 kPa (1,99 vezes) e 576,65 kPa para 1092,68 kPa (1,89 vezes), respectivamente. Praticamente um aumento médio de aproximadamente 2,06 vezes em relação à porosidade inicial.

Comportamentos similares a este são descritos na literatura por pesquisadores que relatam a influência destes parâmetros no comportamento de geomateriais melhorados com

agentes cimentantes (Consoli *et al.*, 2010, 2012, 2014, 2022; Bruschi, 2020; Mafessoli (2022); Daronco, 2022; Chaves *et al.*, 2023; entre outros).

#### 4.5.3 Relação $\eta/C_{iv}$ para previsão de $q_t$

Conforme detalhado no item 2.5.4, foi estabelecida uma relação entre as resistências à tração por compressão diametral (RTCD) e os índices de porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{iv}$ ) para cada corpo de prova. Essa relação foi modelada por meio de uma função do tipo potência, como ilustrado na Figura 4.14. Nota-se uma eficácia do parâmetro  $\eta/C_{iv}$  na previsão da RTCD do resíduo de bauxita aprimorado com cimento Portland, abrangendo toda a gama de valores investigados e resultando em um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,93. O gráfico evidencia que, conforme esperado, à medida que o índice  $\eta/C_{iv}$  aumenta, a resistência diminui.

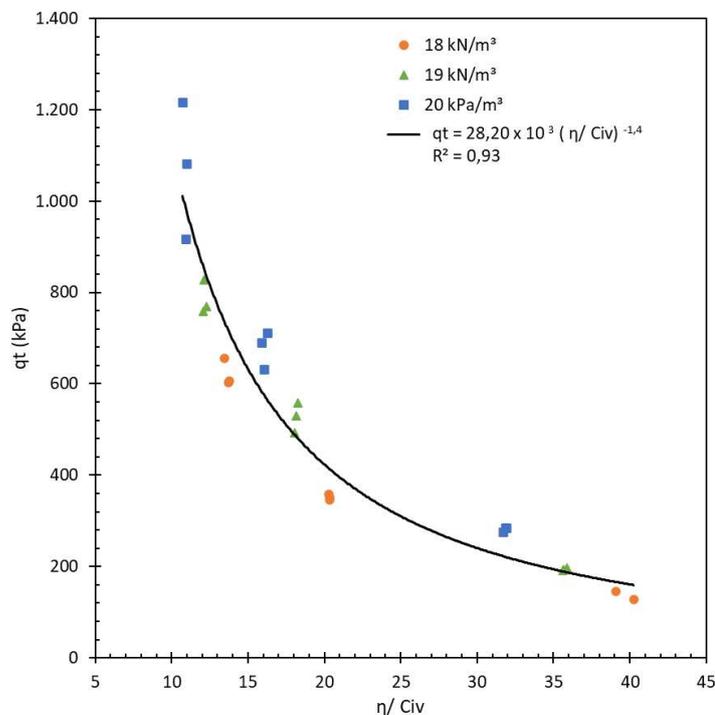


Figura 4. 13: Relação entre o parâmetro  $\eta/C_{iv}$  e a resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ )

Fonte: Autor (2024)

Da mesma forma que para a RCS, foi definido um expoente de ajuste ( $k$ ) equivalente a 1 para a RTCD. Outros estudos, como Mafessoli (2022), Consoli *et al.* (2022, 2023) e Chaves *et al.* (2023), também definiram o expoente de ajuste ( $k$ ) como 1. Essa escolha foi feita para estabelecer correlações entre o desempenho mecânico, medido pelo índice  $\eta/C_{iv}$ , de geomateriais de comportamento friccional quando submetidos à cimentação artificial. Esses geomateriais eram predominantemente compostos por frações granulométricas arenosas (de finas a grossas) e/ou apresentavam um alto teor de finos não plásticos. O expoente de ajuste ( $k$ ) é geralmente mais baixo para materiais mais finos. O coeficiente externo ( $B$ ) foi fixado em 1,40

tanto para os resultados da RCS como para os resultados da resistência a tração por compressão diametral (RTCD), com o intuito de equalizar e facilitar as análises. A equação 4.2 representa a curva potencial que relaciona a RCS ao valor de  $\eta/C_{iv}$ .

$$q_t = 28,20 \times 10^3 \times \left( \frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{-1,4}; R^2 = 0,93 \quad (4.2)$$

#### 4.6 RELAÇÃO $q_t/q_u$

O estudo de materiais cimentados tem demonstrado que para cada tipo de geomaterial cimentado, existe uma relação única entre as resistências à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) e resistência à compressão simples ( $q_u$ ). Essa relação é representada por um escalar único, independente da porosidade, teor de cimento e da relação porosidade/teor volumétrico de cimento (Consoli *et al.*, 2010, 2012, 2014, 2022; Mafessoli, 2022; Chaves *et al.*, 2023). Dass *et al.* (1994) analisando a resistência à tração por compressão diametral, tração direta e compressão simples de amostras de areia artificialmente cimentadas percebeu que a relação  $q_t/q_u$  varia de 11% a 12%. Consoli *et al.*, (2014) com base em seus estudos concluiu que a relação  $q_t/q_u$  de areia artificialmente cimentada apresenta uma maior faixa de variação, entre 9% e 18%, dependendo das características da areia e ligante empregado. Mafessoli (2022) e Chaves (2023), obtiveram um valor equivalente a 11% para resíduo de ferro artificialmente cimentado.

Da mesma forma que os autores citados anteriormente, buscou-se identificar os valores característicos do resíduo de bauxita artificialmente cimentado. Essa identificação baseou-se na análise das equações que relacionam  $q_u$  e  $q_t$  ao parâmetro  $\eta/C_{iv}$ . Notou-se que ambas as equações compartilham expoentes internos ( $k$ ) e externos ( $B$ ) idênticos, o que resulta na relação direta entre as formulações para obtenção das resistências, divergindo somente no valor escalar. Ao dividir a equação 4.2 pela equação 4.1, obtém-se a equação 4.3, que expressa a relação única ( $q_t/q_u = \xi$ ):

$$q_u = 194,55 \times 10^3 \times \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})} \right]^{-1,4} \quad (4.1)$$

$$q_t = 28,20 \times 10^3 \times \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})} \right]^{-1,4} \quad (4.2)$$

$$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{28,20 \times 10^3 \times \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})} \right]^{-1,4}}{194,55 \times 10^3 \times \left[ \frac{\eta}{(C_{iv})} \right]^{-1,4}} = 0,14 \quad (4.3)$$

Essa relação também pode ser obtida a partir do coeficiente angular do gráfico apresentado na Figura 4.15. A partir dos valores obtidos observa-se, que para o resíduo de bauxita melhorado com cimento Portland, a relação  $q_t/q_u$  ( $\xi$ ) resulta em um escalar igual a 0,14

com  $R^2$  de 0,98. Logo, existe uma proporcionalidade direta entre a RTCD e RCS do material, dentro da faixa de características estudadas, que independe da porosidade ( $\eta$ ), do teor de cimento ( $C_{iv}$ ), ratificando estudos publicados Consoli *et al.* (2007), Consoli (2014), Chaves *et al.* (2023) entre outros.

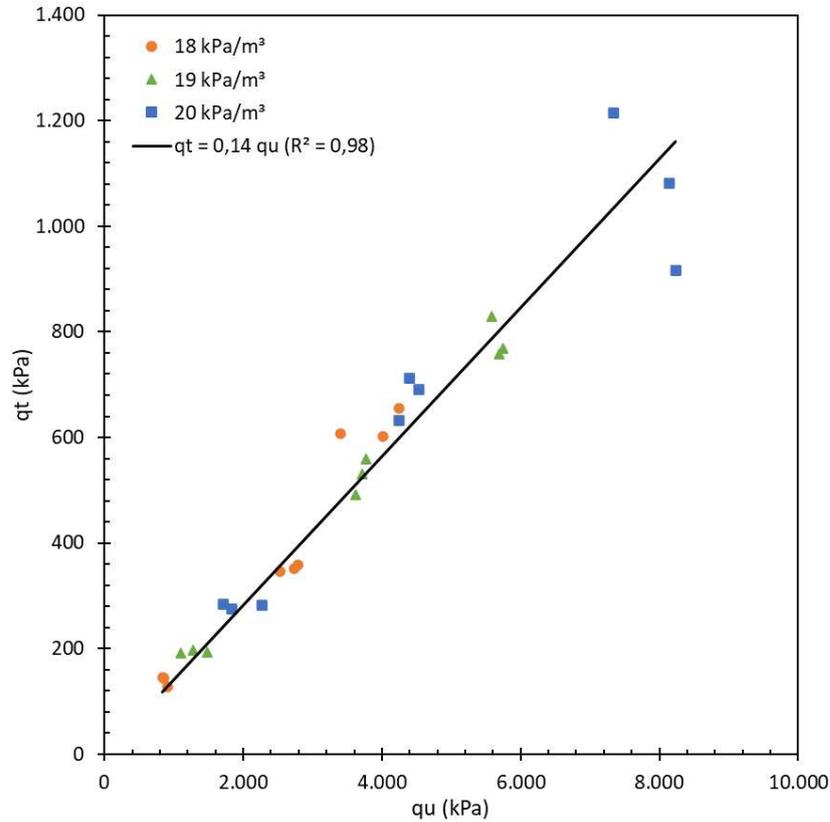


Figura 4. 14: Resistência à tração por compressão diametral em função da resistência a compressão simples

Fonte: Autor (2024)

#### 4.7 ENSAIOS TRIAXIAIS CONSOLIDADOS ISOTROPICAMENTE NÃO DRENADOS (CIU)

Na Tabela 4.10 estão apresentadas as características dos corpos de prova (CP's) submetidos ao ensaio triaxiais consolidados isotropicamente não drenados (CIU), cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental exibido no item 3.2.2. Na Tabela 4.11 constam os resultados obtidos dos ensaios triaxiais CIU. Todos os CP's foram moldados na umidade ótima de 18% como o teor de cimento de 0% e 2%, e o peso específico aparente seco fixo de 20 kN/m³. Para cada configuração de amostra, foram realizados um conjunto de três ensaios, com tensões efetivas confinantes de 100, 200 e 300 kPa.

Tabela 4. 9: Características dos CP's submetidos aos ensaios triaxiais monotônicos do tipo CIU

Amostra	$p'_0$ (kPa)	$C_i$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$C_{iv}$ (%)	$\eta / C_{iv}$	e	B
CP0-20bt	100	0%	20,17	37,07%	---	---	0,59	0,96
CP0-20at	200	0%	20,06	37,41%	---	---	0,60	0,94
CP0-20ot	300	0%	19,81	38,19%	---	---	0,62	0,97
CP2-20bt	100	2%	19,81	38,21%	1,38%	27,77	0,62	0,92
CP2-20yt	200	2%	19,86	38,05%	1,37%	27,79	0,61	0,95
CP2-20et	300	2%	19,81	38,20%	1,37%	27,88	0,62	0,93

$p'_0$  = tensão média efetiva inicial; e = índice de vazios.

Fonte: Autor (2024)

Tabela 4. 10: Resultados dos ensaios triaxiais monotônicos do tipo CIU em resíduo de bauxita puro e melhorado com 2% de cimento.

Amostra	$p'_0$ (kPa)	Condição de Pico				Condição Residual				
		$\varepsilon_a$ (%)	$p'$ (kPa)	$q$ (kPa)	$q/p'$	$\Delta u$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q$ (kPa)	$q/p'$	$\Delta u$ (kPa)
CP0-20bt	100	4,71%	908,82	1567,24	1,72	-286,41	1075,38	1640,44	1,53	-428,57
CP0-20at	200	4,61%	1123,37	2020,36	1,80	-249,92	1225,16	1950,10	1,59	-375,13
CP0-20ot	300	5,10%	1413,92	2500,80	1,77	-280,32	1300,90	1992,60	1,53	-336,70
CP2-20bt	100	3,21%	1308,15	2688,73	2,06	-311,91	1027,77	1732,82	1,69	-350,16
CP2-20yt	200	3,40%	1381,65	2970,83	2,15	-191,38	1130,07	1862,13	1,65	-309,36
CP2-20et	300	2,80%	1662,80	3433,42	2,06	-218,33	1555,95	2669,36	1,72	-366,16

$p'_0$  = tensão média efetiva inicial;  $\varepsilon_a$  = deformação axial;  $p'$  = tensão média efetiva;  $q$  = tensão de cisalhamento;  $\Delta u$  = excesso de poropressão.

Fonte: Autor (2024)

#### 4.7.1 Efeito da tensão de confinamento no comportamento tensão x deformação

Na Figura 4.16, são apresentadas as curvas de tensão em função da deformação axial, juntamente com as curvas de poropressão em função da deformação axial durante o processo de cisalhamento de corpos de prova (CP's) com 0% de teor de cimento Portland. Observa-se que essas curvas seguem um padrão de comportamento esperado e descrito pela literatura. A inclinação inicial das curvas de tensão em relação à deformação axial é significativamente elevada, mas tende a diminuir com o aumento da deformação axial, culminando no ponto de ruptura. É perceptível que o aumento na tensão de confinamento ocasiona um crescimento na resistência de pico e um aumento na rigidez do material. Esse efeito foi observado por diversos autores, tais como Schnaid, Prietto e Consoli (2001), Newson *et al.* (2006), Schnaid *et al.* (2014), Gonçalves (2021), Silva *et al.* (2022), Mafessoli (2022), Bruschi *et al.* (2023), Chaves *et al.* (2023).

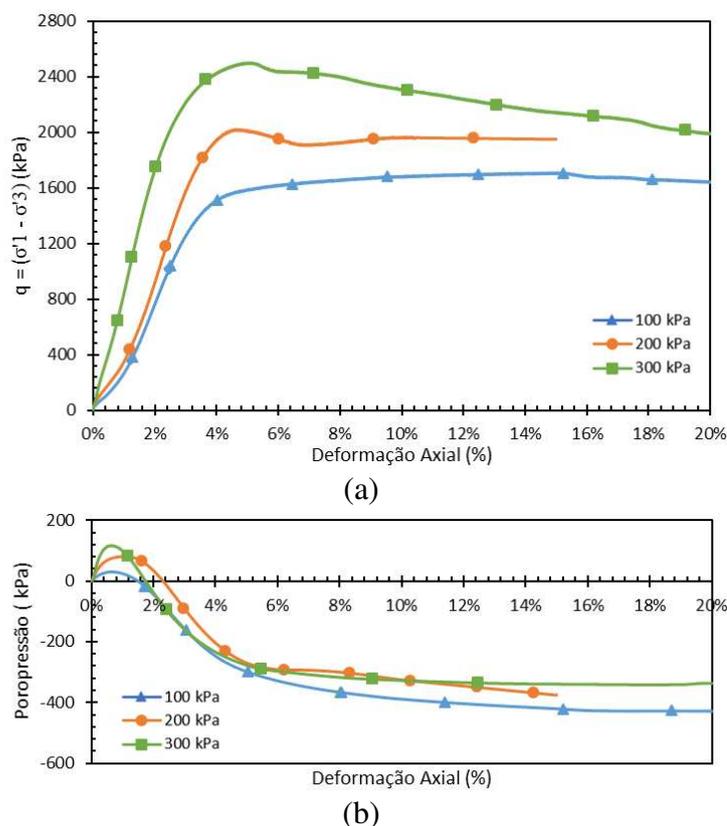


Figura 4. 15:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% de cimento Portland

Fonte: Autor (2024)

Percebe-se que as curvas de tensão em função da deformação axial não apresentam um pico bem definido no momento de ruptura. Os CP's não experimentaram uma queda abrupta na resistência após a ruptura e não exibiram um plano de ruptura claramente definido (Figura 4.17). Essa observação sugere que o material manteve uma certa capacidade de carga mesmo após atingir o ponto de ruptura, indicando comportamento dúctil. Esse comportamento foi também notado por autor como Newson *et al.* (2006), Gonçalves (2021), Consoli *et al.* (2022), Mafessoli (2022), Bruschi *et al.* (2023), Chaves *et al.* (2023).

Para as tensões confinantes de 100 kPa e 200 kPa, a curva de tensão em função da deformação axial permaneceu praticamente constante após o suave pico observado. No entanto, para a tensão confinante de 300 kPa, a curva de tensão em função da deformação axial apresentou um pico suave no momento de ruptura. Notavelmente, a tensão de desvio após a ruptura mostrou uma queda com uma taxa praticamente constante até atingir uma deformação de 20%.

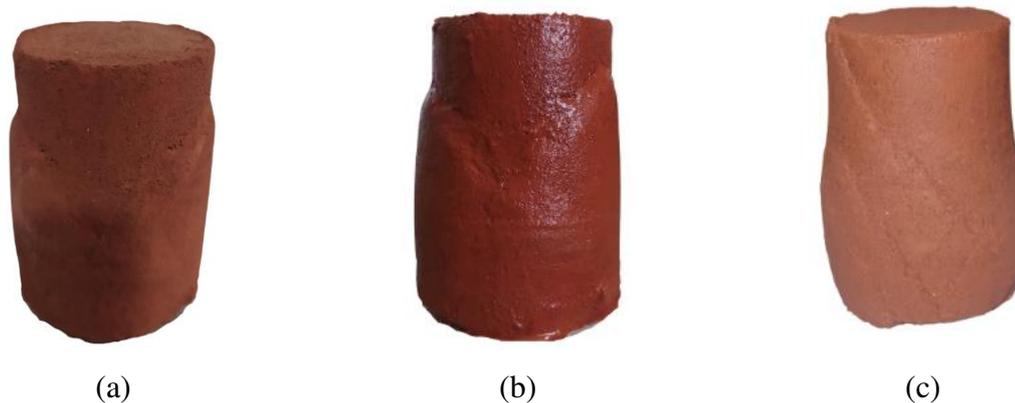


Figura 4. 16: Cp's não cimentados após ensaio triaxial: (a) tensão confinante 100kPa; (b) tensão confinante 200kPa; (c) tensão confinante 300kPa.

Fonte: Autor (2024)

No que tange à curva de poropressão x deformação axial, todos os CP's desenvolveram inicialmente um excesso de poro-pressão positiva devido à contração inicial dos CP's. Percebe-se que quanto maior a tensão de confinamento maior a poropressão positiva gerada, conforme esperado. Entretanto em um certo momento essa poropressão sofre uma variação chegando a atingir valores negativos. Essa tendência de expansão e geração de poropressão negativa durante a ruptura, está atrelado ao fato dos CP's terem sido moldados com um alto peso específico, o que promove a tendência de comportamento dilatante. Após atingir a tensão desviadora máxima, as curvas poropressão x deformação axial tendem a estabilizar. Materiais densos saturados sofrem dilatação volumétrica no momento de ruptura em ensaios CID (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001; Mafessoli, 2022; Bruschi *et al.*, 2023; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; Chaves *et al.*, 2023), entretanto, nos ensaios CIU não ocorre variação volumétrica devido à configuração do próprio ensaio. Em situações assim, a água é tensionada e a poropressão reduz a ponto de atingir valores negativos. Para as tensões de confinamento de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa os CP's apresentaram um parâmetro  $A_f$  de Skempton na ruptura equivalente a -0,18, -0,12 e -0,11 respectivamente, confirmando o comportamento dilatante do material. Nota-se que ocorre uma leve redução da tendência dilatante com o aumento da tensão de confinamento. Essa redução da tendência dilatante também foi registrada por autores como Mafessoli (2022), Bruschi *et al.* (2023), Chaves *et al.* (2023), Farenzena *et al.* (2024).

A Figura 4.18 conta com as curvas tensão x deformação axial, assim como as curvas de poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 2% de teor de cimento Portland. Assim como para 0% de teor de cimento os CP's com 2% de teor de cimento apresentaram uma curva de tensão x deformação axial com elevada inclinação inicial, que tende

a reduzir com o aumento da deformação axial até o ponto de ruptura. O aumento na tensão de confinamento também resultou num crescimento da resistência de pico do material melhorado.

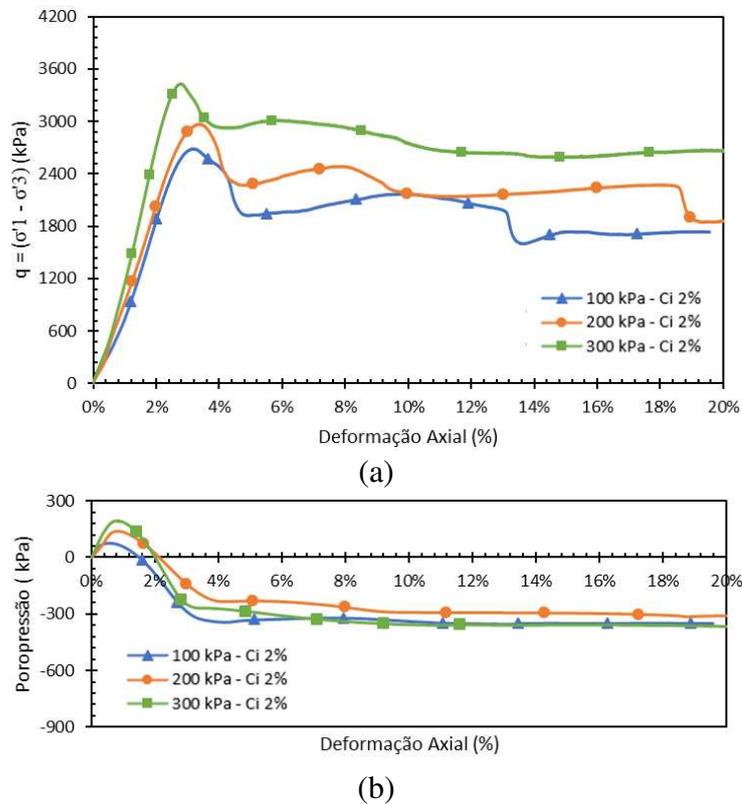


Figura 4. 17:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 2% de cimento Portland

Fonte: Autor (2024)

Todos os CP's melhorados com 2% de cimento apresentaram comportamento similares pós pico. Todos apresentaram um pico bem definido e uma queda brusca de tensão de desvio após a ruptura, caracterizando assim um comportamento claramente frágil, formando planos de cisalhamento bem definidos (Figura 4.19).

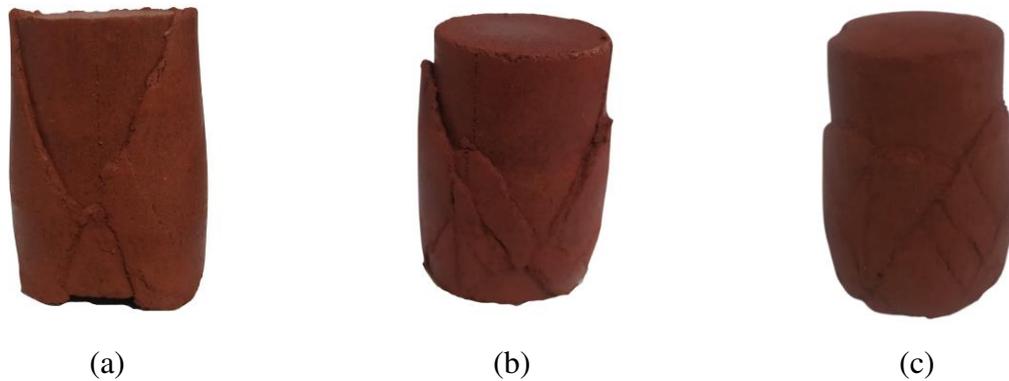


Figura 4. 18:Cp's cimentados após ensaio triaxial: (a) tensão confinante 100kPa; (b) tensão confinante 200kPa; (c) tensão confinante 300kPa.

Fonte: Autor (2024)

Esses comportamentos são típicos de materiais cimentados e foram relatados em estudos anteriores por autores como Schnaid, Prietto e Consoli (2001), Mafessoli (2022), Bruschi *et al.* (2023), Consoli *et al.* (2023), Scheuermann Filho e Consoli (2023), Chaves *et al.* (2023).

Relativamente à curva de poropressão x deformação axial, todos os CP's com 2% de teor de cimento desenvolveram comportamentos similares aos CP's com 0% de cimento. Inicialmente experimentaram um excesso de poropressão positiva que se mostrou ser maior para tensão de confinamento maior, conforme esperado. Contudo, em um certo momento essa poropressão sofre uma variação chegando a atingir valores negativos. Essa tendência de expansão e geração de poropressão negativa durante a ruptura, é intrínseco de CP's bem compactados e cimentados. Após atingir a tensão desviadora máxima, as curvas poropressão x deformação axial tendem a estabilizar. Esse comportamento foi relatado por autores como Consoli *et al.* (2007) e Mafessoli (2022). Assim como explicado anteriormente, materiais densos saturados sofrem dilatação volumétrica no momento de ruptura em ensaios CID (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001; Consoli *et al.*, 2007, 2022, 2023; Bruschi *et al.*, 2023; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; Chaves *et al.*, 2023), entretanto, nos ensaios CIU não ocorre variação volumétrica devido à configuração do próprio ensaio. Em situações assim, a água é tensionada e a poropressão reduz a ponto de atingir valores negativos. Para as tensões de confinamento de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa os CP's apresentaram um parâmetro  $A_f$  de Skempton na ruptura equivalente a -0,12, -0,06 e -0,06 respectivamente, confirmando o comportamento dilatante do material. O aumento da tensão confinante resultou numa leve redução da tendência dilatante. Essa redução da tendência dilatante também foi registrada por autores como Mafessoli (2022), Bruschi *et al.* (2023), Scheuermann Filho e Consoli (2023), Chaves *et al.* (2023), Farenzena *et al.* (2024).

#### **4.7.2 Efeito da adição do cimento no comportamento tensão x deformação**

A adição de 2% de cimento Portland, promoveu um incremento de resistência em 41,7%, 32,0% e 27,2% para as tensões de confinamento de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa respectivamente (Figura 4.20). Ou seja, o processo de melhoramento proporcionou um aumento médio de 33,6% da resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita.

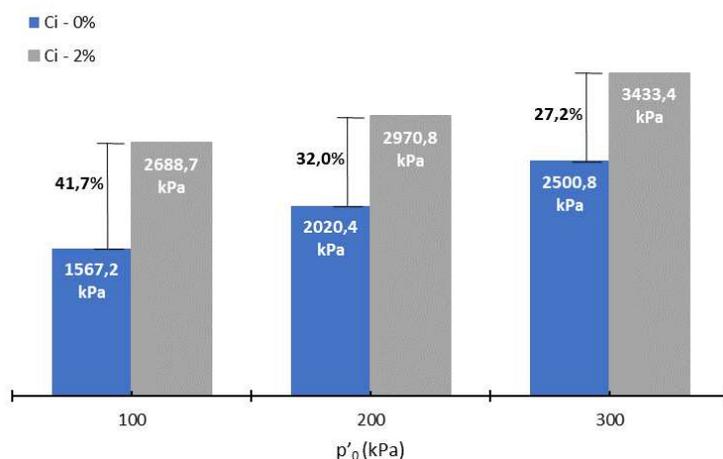
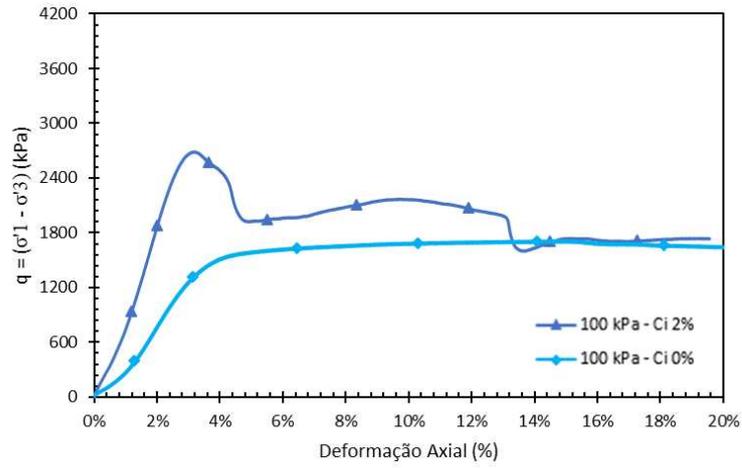


Figura 4. 19: Incrementos da tensão desviadora de pico com a adição de cimento para diferentes tensões de confinamento

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 4.11 pode-se observar que as deformações no estado de pico variaram entre 4,71% e 5,10% para resíduos com 0% de teor de cimento. Os resíduos melhorados com 2% de teor de cimento apresentaram as deformações no estado de pico variando de 2,80% a 3,40%, indicando maior rigidez das amostras. A rigidez inicial e resistência de pico percebidas nos CP's cimentados são devidas à matriz cimentícia que impede o movimento relativo entre os grãos individuais. Contudo, o modo de ruptura se torna mais frágil com a adição de 2% de teor de cimento. Segundo Lade e Trads (2014), a cimentação controla o comportamento do material até a quebra das ligações, pois a parcela coesiva é mobilizada primeiro. A partir daí, o componente de atrito entra em ação.

Percebe-se pelas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 que a adição de cimento resultou numa maior tensão de desvio na ruptura. Em contrapartida, promoveu um comportamento frágil. Essa influência que a adição de cimento exerce no comportamento tensão-deformação do material, tem sido reconhecida entre uma variedade de geomateriais, como argilas moles, argilas duras, solos granulares e solos residuais, resíduos e mineração (Schnaid, Prietto e Consoli, 2001; Consoli *et al.*, 2007, 2022, 2023; Moreira, 2020; Daronco, 2022; Mafessoli, 2022; Scheuermann Filho e Consoli, 2023; Chaves *et al.*, 2023; Bruschi *et al.*, 2023). Assim como os solos cimentados, o comportamento tensão-deformação do resíduo de bauxita cimentados quando submetidos ao cisalhamento é geralmente rígido inicialmente, aparentemente elástico-linear, até alcançar a plastificação, que ocorre em um ponto bem definido. A partir desse ponto o resíduo experimenta deformações plásticas crescentes até atingir a ruptura, que ocorre de maneira frágil. Esse mesmo comportamento foi anotado por Chaves *et al.* (2023), Bruschi *et al.* (2023), Consoli *et al.* (2022, 2023). Essa rigidez inicial e resistência de pico apresentados é devido à matriz cimentícia que impede o movimento relativo entre os grãos individuais.



(a)

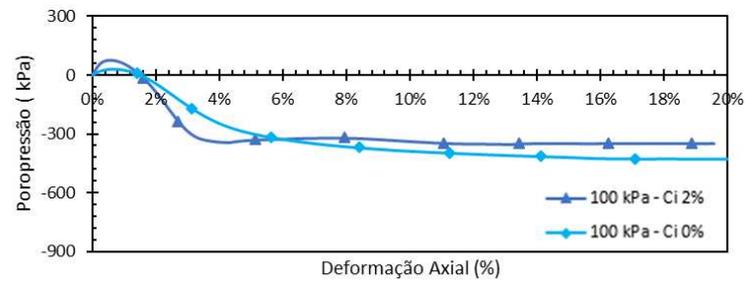
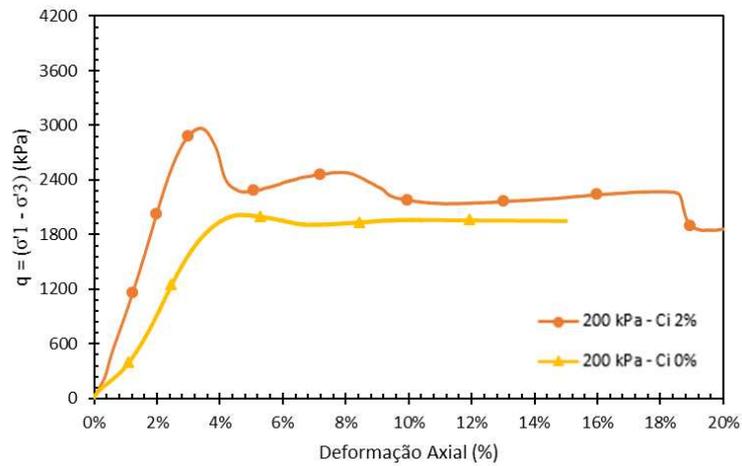
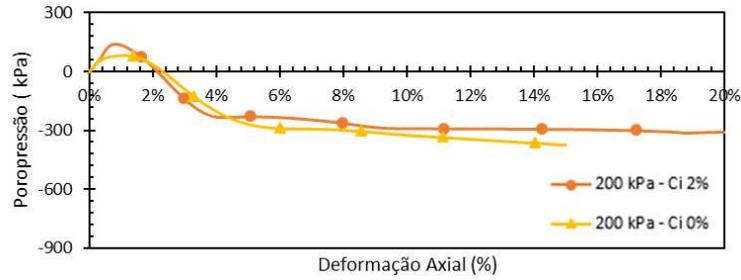


Figura 4. 20: Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 100 kPa

Fonte: Autor (2024)



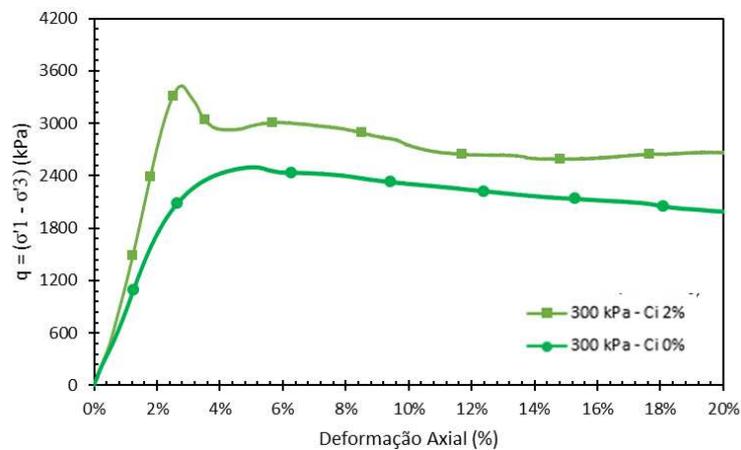
(a)



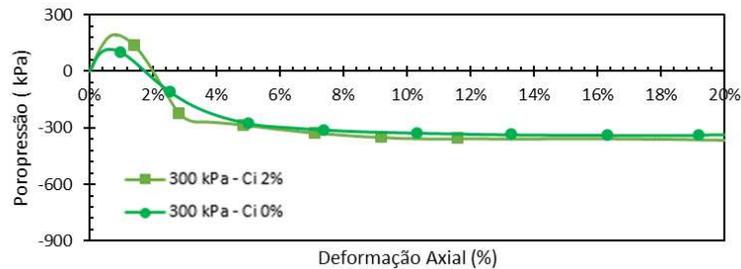
(b)

Figura 4. 21:Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 200 kPa

Fonte: Autor (2024)



(a)



(b)

Figura 4. 22: Curvas (a) tensão x deformação axial e (b) poropressão x deformação axial durante o cisalhamento de CP's com 0% e 2% de cimento Portland sob tensão confinante de 300 kPa

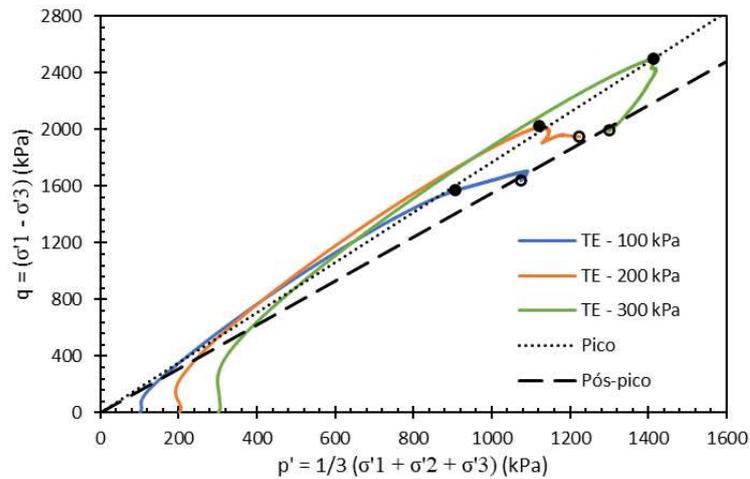
Fonte: Autor (2024)

Analisando a curva de poropressão x deformação axial, percebe-se que os CP's com 2% de teor de cimento desenvolveram comportamentos similares aos CP's com 0% de teor de cimento. Entretanto o excesso de poropressão positiva gerado inicialmente se mostrou maior para em amostra com 2% de teor de cimento, ou seja, ocorre um incremento da poropressão positiva gerado com a adição do cimento. Na ruptura, nota-se que não houve muita diferença entre as amostras com 0% e 2% de teor de cimento. Ambas apresentaram redução da

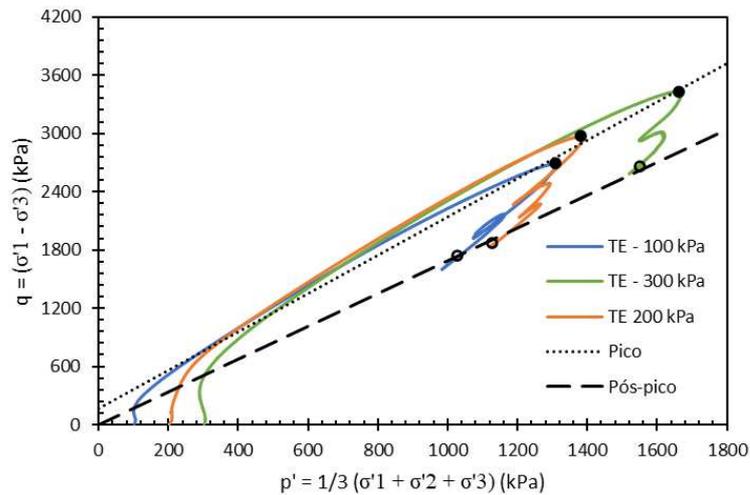
poropressão atingindo valores negativos na ruptura. Destaca-se que a adição de 2% de cimento contribuiu para um leve aumento da tendência dilatante do material, comportamento também observado pelos autores: Consoli *et al.* (2007), Mafessoli (2022), Scheuermann Filho e Consoli (2023), e Farenzena *et al.* (2024).

### 4.7.3 Trajetória de tensões

Os parâmetros efetivos foram calculados a partir do diagrama  $p' \times q$ , assumindo-se como válido o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (envoltória linear). Na Figura 4.24 constam as trajetórias de tensões efetivas, no espaço  $q \times p'$  para os ensaios triaxiais das amostras de resíduo sem adição de cimento e com adição de 2% de teor de cimento.



(a)



(b)

Figura 4. 23: Trajetórias de tensões efetivas, no espaço  $q \times p'$ : (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland

Fonte: Autor (2024)

Com base nos pontos de pico e pós-pico, foi ajustada uma envoltória de ruptura do material. Com a equação da reta que representa as envoltórias, foram determinados os parâmetros ângulos de atrito e coesão no estado de pico de tensões e no estado residual. É importante salientar que foi considerado que após o pico as amostras não apresentariam qualquer tipo de coesão, então a envoltória foi traçada passando na origem ( $c' = 0$  kPa). Essa consideração é adotada por outros autores como Schnaid *et al.* (2015), Silva *et al.* (2022) Chaves *et al.* (2023), Consoli *et al.* (2023), entre outros, pois a parcela coesiva se encontra mobilizada após a ruptura (Lade e Trads, 2014). Conforme observado, o ângulo no estado residual é menor em relação ao estado de pico. Para as amostras não cimentadas o intercepto coesivo efetivo no estado de pico foi aproximadamente 0 kPa (típico de material granulares) e no estado residual foi nulo. Percebeu-se também um elevado ângulo de atrito interno efetivo, 43,09° no estado de pico e 38,03° no estado residual, assim como esperado do resíduo de bauxita. Autores anteriores como Newson *et al.* (2006), Bedin (2006, 2010), Schnaid *et al.* (2014), Gore (2015), Xu *et al.* (2019), Ding *et al.* (2021), entre outros, também registraram um ângulo de atrito variando de 32° a 42° e uma coesão próximo a zero para os resíduos de bauxita estudados (Tabela 2.5).

A adição do cimento resultou no incremento considerável no intercepto coesivo efetivo e uma leve alteração no ângulo de atrito interno efetivo do material (Tabela 4.12), conforme descrito por Consoli, Vendruscolo e Prietto (2003), Whitehurst (1955), Mafessoli (2022), Consoli *et al.* (2023). Com 2% de teor de cimento o intercepto coesivo efetivo no estado de pico variou de aproximadamente 0 kPa para 94,12 kPa. No estado residual o intercepto coesivo efetivo foi nulo. O ângulo de atrito interno efetivo variou de 43,09° para 47,95° no estado de pico e de 38,03° para 41,23° no estado residual.

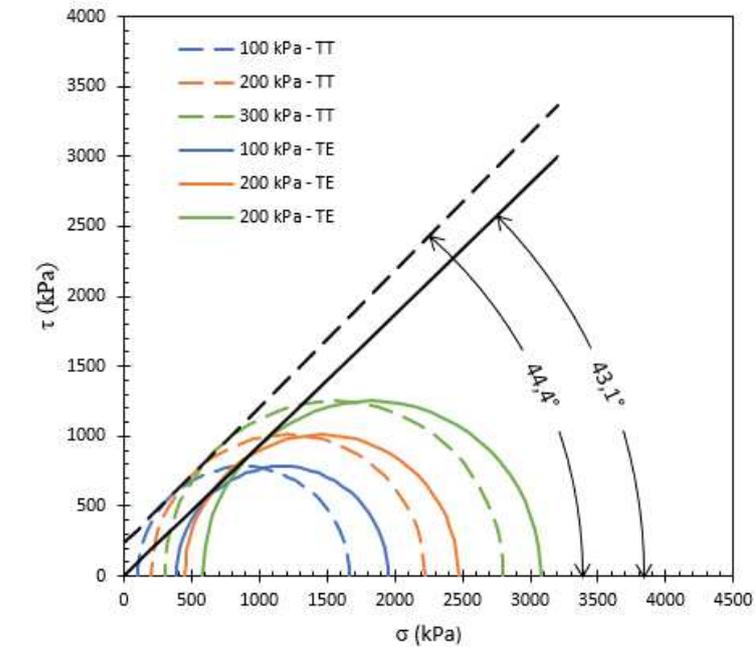
Tabela 4. 11: Parâmetros geotécnicos do resíduo de bauxita no estado de pico e pós pico

Parâmetros geotécnicos efetivos	Teor de Cimento	
	0%	2%
$\phi'_p$	43,09°	47,95°
$c'_p$	0 kPa	94,12 kPa
$\phi'_{pp}$	38,03°	41,23°
$c'_{pp}$	0 kPa	0 kPa

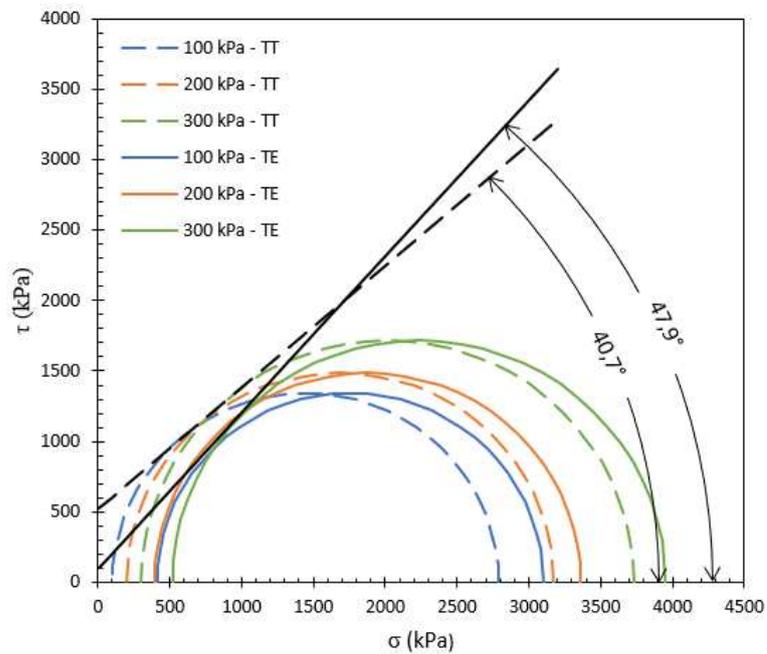
Fonte: Autor (2024)

O aumento do intercepto coesivo do material é devido à formação da matriz cimentícia entre as partículas e promove um incremento do ângulo de atrito interno, devido à mudança de granulometria do material (Consoli, Vendruscolo e Prietto, 2003). Conforme descrito anteriormente, as amostras cimentadas apresentaram uma queda significativa de resistência após a ruptura e isso pode ser constatado pela diferença entre a linha de pico e a linha pós-pico.

Na Figura 4.25 constam as envoltórias de Morh-Coulomb para as tensões totais (TT) e tensões efetivas (TE). O plano de ruptura para tensões totais varia do plano de ruptura para tensões efetivas em função da poropressão gerada no momento de ruptura, uma vez que as tensões totais são o resultado da soma algébrica das tensões efetivas e a poropressão.



(a)



(b)

Figura 4. 24: Envoltórias de Morh-Coulomb: (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland

Fonte: Autor (2024)

#### 4.7.4 Comportamento tensão-deformação normalizado

Pela Figura 4.26 percebe-se que o resíduo de bauxita puro apresenta um valor de razão de tensão  $q/p'$  equivalente a 1,55 após o pico. Os resíduos de bauxita melhorados com cimento apresentam um valor de razão de tensão  $q/p'$  mais elevado, em torno de 1,69 após o pico. Independente das tensões efetivas, os CP's não cimentados encaminharam a um mesmo estado ao final do ensaio, governado pelo comportamento friccional. Percebe-se também que as curvas tendem a convergir a um único ponto ao final do ensaio. Esse mesmo comportamento foi constatado nos CP's cimentados.

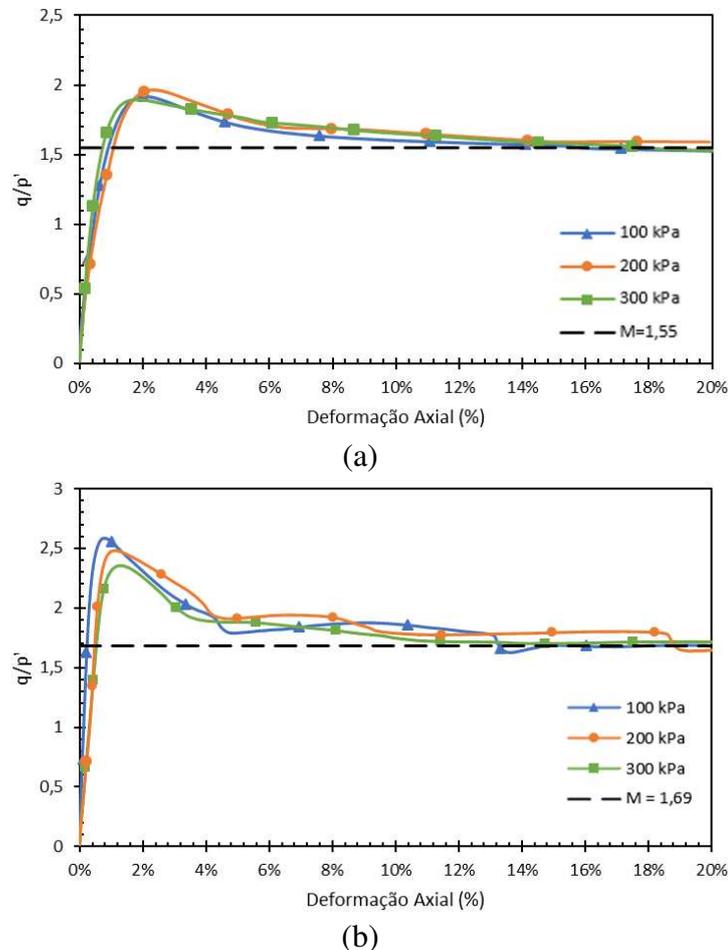


Figura 4. 25: Curvas tensão x deformação axial normalizados: (a) amostras sem a adição de cimento Portland; (b) amostras com 2% de teor de cimento Portland

Fonte: Autor (2024)

Estudos mostram que amostras cimentadas tendem a exibir uma maior relação  $q/p'$  final, o que é um indício de alteração da sua granulometria, tendo em vista que após o cisalhamento o material passa a apresentar partículas de resíduo/cimento aglomeradas, conseqüentemente maiores, que podem acarretar tensões localizadas (Clough *et al.*, 1981; Prietto, 2004; Lade e Trads, 2014; e Scheuermann Filho, 2022, Chaves, 2023).

## 4.8 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RESÍDUO DE BAUXITA CIMENTADO

### 4.8.1 Aplicação do método Consoli (2014)

A partir dos resultados de RCS e RTCD, foram estimados os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) do resíduo de bauxita melhorado com cimento. Esse método foi proposto por Consoli (2014) e encontra-se descrito no item 2.7.1. No item 4.5 foi determinada a relação  $q_t/q_u$  ( $\xi$ ), que resultou em um escalar igual a 0,14. Aplicando o escalar na equação 4.4 e 4.5 obtém-se um ângulo de atrito interno de pico ( $\phi_p$ ) equivalente a  $37,67^\circ$  e um intercepto coesivo de pico ( $c_p$ ) em função do valor da resistência à compressão simples.

$$\phi_p = \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4 \times 0,14}{1 - 2 \times 0,14} \right) = 37,67^\circ \quad (4.4)$$

$$c_p = \frac{q_u \left[ 1 - \left( \frac{1 - 4 \times 0,14}{1 - 2 \times 0,14} \right) \right]}{2 \cos \left[ \sin^{-1} \left( \frac{1 - 4 \times 0,14}{1 - 2 \times 0,14} \right) \right]} = 0,25 \times q_u \quad (4.5)$$

Sabendo que o intercepto coesivo de pico ( $c_p$ ) varia em função  $q_u$  que por sua vez varia em função do  $\eta/C_{iv}$ , para cada relação de porosidade e teor de cimento tem-se um  $c_p$  correspondente. Na Figura 4.27 consta a curva potencial que relaciona a  $c_p$  ao valor de  $\eta/C_{iv}$ .

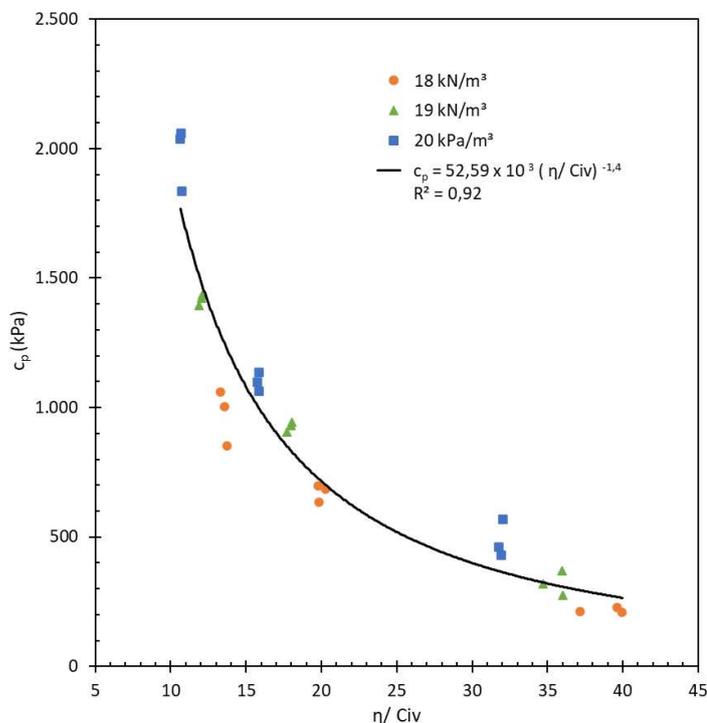


Figura 4. 26: Relação entre o parâmetro  $\eta/C_{iv}$  e o intercepto coesivo efetivo de pico ( $c_p$ ) para o método de Consoli (2014)

Fonte: Autor (2024)

A equação 4.6 representa a curva potencial que relaciona a  $c_p$  ao valor de  $\eta/C_{iv}$ .

$$c_p = 52,59 \times 10^3 \times \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{-1,4} \quad (4.6)$$

Para fins de comparação foi usado o mesmo peso específico aparente seco e teor de cimento na determinação da coesão pelo método Consoli (2014). Para o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) equivalente a 20 kPa e um teor de cimento igual a 2% obtém-se uma  $\eta/C_{iv}$  (médio) de aproximadamente 31,92, conforme apresentado na Tabela B.2. Aplicando o valor na equação 4.6:

$$\text{Para } \frac{\eta}{C_{iv}} = 31,92 \rightarrow c_p = 52,59 \times 10^3 \times 31,92^{-1,4} = 412,30 \text{ kPa} \quad (4.7)$$

#### 4.8.2 Aplicação do método Mitchell (1981)

O método considera que o ângulo de atrito do material encontre-se entre os ângulos de 40° e 45° conforme mostrado na equação (4.8). Sabendo que o intercepto coesivo de pico ( $c_p$ ) varia em função  $q_u$ , o qual, por sua vez, é influenciado por  $\eta/C_{iv}$ , para cada relação entre porosidade e teor de cimento, obtém-se um valor correspondente de  $c_p$ . O  $c_p$  pode ser calculado pela 4.9.

$$\phi_p = 40^\circ \Leftrightarrow 45^\circ \quad (4.8)$$

$$c_p = 50 + 53,64 \times 10^3 \times \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{-1,4} \quad (4.9)$$

Para peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) equivalente a 20 kPa e um teor de cimento igual a 2% obtém-se uma  $\eta/C_{iv}$  (médio) de aproximadamente 31,92 conforma apresentado na Tabela B.2. Aplicando o valor na equação 4.9:

$$\text{Para } \frac{\eta}{C_{iv}} = 31,92 \rightarrow c_p = 50 + 53,64 \times 10^3 \times 31,92^{-1,4} = 470,53 \text{ kPa} \quad (4.10)$$

#### 4.8.3 Aplicação do método de Schnaid, Prietto e Consoli (2001)

A resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita foi estimada a partir da resistência à compressão não confinada ( $q_u$ ) e do ângulo de atrito efetivo de pico do resíduo não cimentado ( $\phi_p'$ ). Esse método foi apresentado por Schnaid, Prietto e Consoli (2001) e encontra-se descrito no item 2.7.3. A partir dos valores apresentados na Tabela B.2 foi determinado o valor médio da resistência à compressão simples ( $q_u$ ) para o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) equivalente a 20 kPa e um teor de cimento igual a 2%. Aplicando o valor médio de  $q_u$  (1943,89 kPa) e o ângulo de atrito efetivo de pico do resíduo puro obtido com os ensaios triaxiais ( $\phi_p' = 43,09^\circ$ ) na equação 2.8 foi possível estimar a resistência desviadora de ruptura (pico) do resíduo de bauxita cimentado com 2% de teor de cimento para diferentes tensões de confinamento.

$$\text{Para } p'_i = 100 \rightarrow q_f = \frac{2 \times \sin 43,09^\circ}{1 - \sin 43,09^\circ} \times 100 + 1943,89 = 2375,01 \text{ kPa} \quad (4.8)$$

$$\text{Para } p'_i = 200 \rightarrow q_f = \frac{2 \times \sin 43,09^\circ}{1 - \sin 43,09^\circ} \times 200 + 1943,89 = 2806,30 \text{ kPa} \quad (4.9)$$

$$\text{Para } p'_i = 300 \rightarrow q_f = \frac{2 \times \sin 43,09^\circ}{1 - \sin 43,09^\circ} \times 300 + 1943,89 = 3668,72 \text{ kPa} \quad (4.10)$$

#### 4.8.4 Relação entre os valores estimados e os obtidos nos ensaios

Na Tabela 4.13, constam os valores estimados por meio dos diferentes métodos e os valores obtidos por meio do ensaio triaxial CIU. Comparando o método de Consoli (2014) com os parâmetros totais obtidos nos ensaios triaxiais, percebeu-se que o método subestimou o ângulo de atrito interno em 7,60% (de 40,77° para 37,67°) e o intercepto coesivo em 27,36% (de 567,62 kPa para 412,30 kPa). Comparando com os parâmetros efetivos, notou-se que o método subestimou o ângulo de atrito interno em 21,44% (de 47,95° para 37,67°) e superestimou o intercepto coesivo em 77,17% (de 94,12 kPa para 412,30 kPa). Percebe-se que apesar do método ser indicado para previsão de parâmetros efetivos os valores estimados pelo método de método Consoli (2014) se aproximam mais dos parâmetros totais obtidos nos ensaios triaxiais do tipo CIU. Em linhas gerais, o método de Consoli (2014) revelou ser conservador na previsão dos parâmetros totais obtidos por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU. O método funciona como um estudo preliminar, proporcionando uma compreensão inicial da ordem de grandeza dos parâmetros de resistência. No entanto, torna-se imperativo a realização de ensaios triaxiais subsequentes para obter resultados mais precisos para projeto que garantam segurança e economia.

Tabela 4. 12: Resumo da aplicação do método Consoli (2014)

Parâmetros geotécnicos	Consoli (2014)	Mitchell (1981)	Ensaio triaxial (parâmetros totais)	Ensaio triaxial (parâmetros efetivos)
Ângulo de atrito ( $\phi_p$ )	37,67°	40° a 45°	40,77°	47,95°
Intercepto coesivo ( $c_p$ )	412,30 kPa	470,53 kPa	567,62 kPa	94,12 kPa

Fonte: Autor (2024)

Comparando o método de Mitchell (1981) com os parâmetros totais obtidos nos ensaios triaxiais, percebeu-se que o ângulo de atrito interno se encontra dentro da faixa definida destoando o limite inferior em 1,89% (de 40,77° para 40°). O intercepto coesivo foi subestimado em 17,10% (de 567,62 kPa para 470,53 kPa). Comparando com os parâmetros efetivos, notou-se o ângulo de atrito interno encontra-se fora do intervalo definido destoando em 6,15% do limite superior (de 47,95° para 45°). O intercepto coesivo foi superestimado em

80,00% (de 94,12 kPa para 470,53 kPa). Com base no comparativo pode-se afirmar que o método de Mitchell (1981), se mostrou satisfatório para a previsão dos parâmetros totais obtidos por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU. Assim como o método de Consoli, esse funciona como um estudo preliminar, proporcionando uma compreensão inicial da ordem de grandeza dos parâmetros de resistência. Entretanto, é essencial a realização de ensaios triaxiais subsequentes para obter resultados mais precisos para projeto que garantam segurança e economia.

Na Figura 4.29 encontram-se exibidas as envoltórias de ruptura traçadas com base nos resultados dos ensaios triaxiais e com base nos parâmetros de resistência estimadas pelos diferentes métodos.

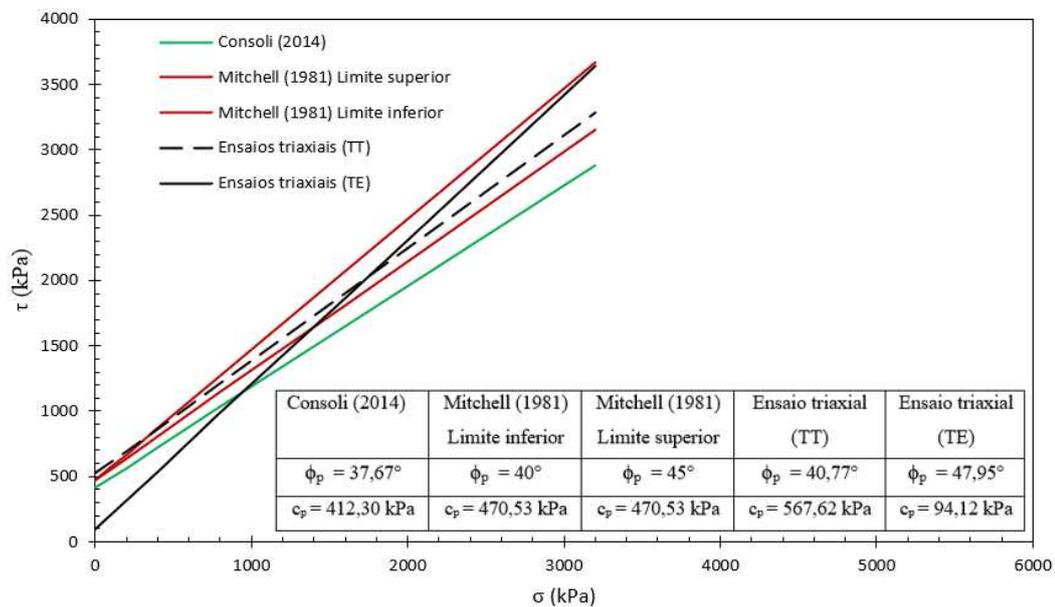


Figura 4. 27: Envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb de resíduo de bauxita cimentado obtidas por meio dos ensaios triaxiais e por meio de métodos de estimativa.

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 4.14 constam os valores de tensão desviadora de pico (ruptura) estimados e obtidos por meio do ensaio. Com base no erro associado pode-se afirmar que para o resíduo de bauxita melhorado com cimento, o método de Schnaid, Prietto e Consoli (2001), se mostrou ser satisfatório, sendo capaz de estimar valores muito próximos da realidade.

Tabela 4. 13: Resumo da aplicação do método Schnaid, Prietto e Consoli (2001)

Tensão confinante efetiva (kPa)	qr estimado (kPa)	qr obtido no ensaio (kPa)	Erro associado (%)
100	2375,01	2688,73	11,66%
200	2806,30	2970,83	5,54%
300	3237,51	3433,68	5,71%

Fonte: Autor (2024)

## 4.9 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DAS PILHAS

### 4.9.1 Considerações iniciais

Nas análises foram consideradas as pilhas na condição drenada e não drenada. Em ambas as condições foram desenvolvidas análises estáticas e pseudoestáticas. Para as análises pseudoestáticas foi adotada uma aceleração sísmica horizontal de 0,131 g que corresponde à aceleração máxima para um tempo de recorrência de 9975 anos. Segundo o relatório n° SLU-F-014223-001-R2 (2021), esse valor foi definido com base nos estudos sísmicos desenvolvidos na região do sítio da ALUMAR para diferentes tempos de recorrência (TR) (Tabela 4.19).

Tabela 4. 14: Acelerações horizontais máximas.

T <sub>R</sub> (anos)	72	475	975	2475	4975	9975
PGA	0,009g	0,029g	0,043g	0,069g	0,096g	0,131g

PGA - *peak ground acceleration* (aceleração de pico do terreno)

Fonte: ALUMAR (2021)

Os fatores de segurança (FS) foram considerados de acordo com a ABNT NBR 13028 (2017) e ANCOLD (2019). Para a condição estática foi considerado um fator de segurança mínimo de 1,30 e para a condição pseudoestática foi considerado 1,10.

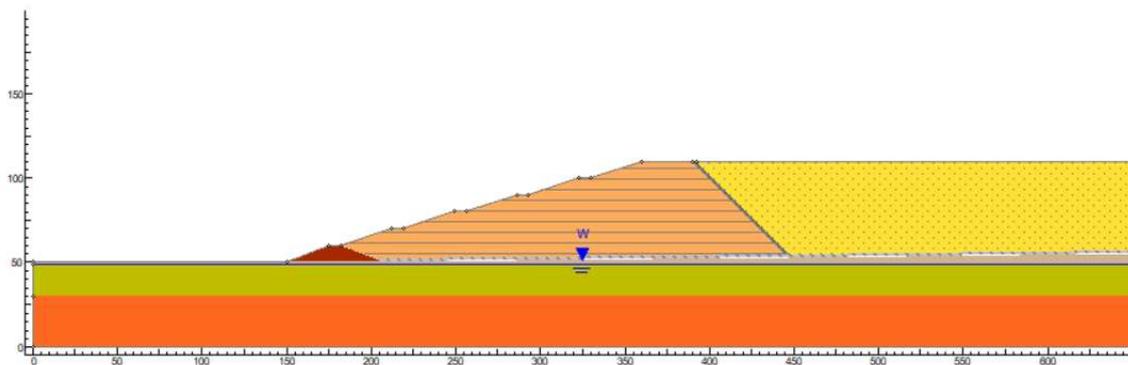
### 4.9.2 Geometria das pilhas

As pilhas de resíduo foram concebidas com a geometria no formato de pirâmide, com duas zonas, uma zona estrutural periférica e uma zona central interna (zona interna) separadas por um dreno chaminé inclinado. Foi considerado um dreno chaminé com uma inclinação de 45% com o intuito de drenar possíveis líquidos presentes na zona interna e evitar a passagem desses líquidos para a zona estrutural. Foi adotado um dreno de fundo com uma inclinação de 1% com o intuito de permitir a drenagem para o exterior da pilha. A zona estrutural foi definida com um comprimento máximo da base da seção transversal de 300 m. Foram considerados dois cenários para as análises: um onde a zona estrutural compreende resíduo de bauxita compactado no peso específico de 20 kN/m<sup>3</sup> com 0% de teor de cimento Portland (PC1); outro onde a zona estrutural compreende resíduo de bauxita compactado no peso específico de 20 kN/m<sup>3</sup> com 2% de teor de cimento Portland (PC2). A geometria da seção transversal das pilhas encontra-se resumida na Tabela 4.16 e exibida na Figura 4.30.

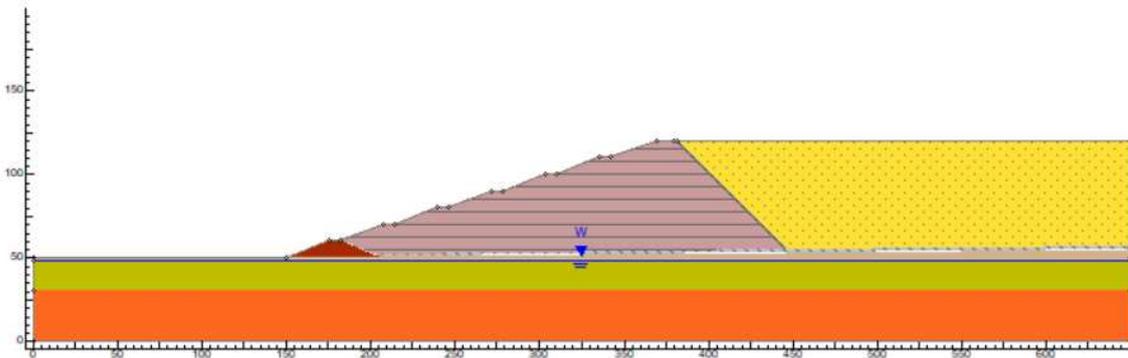
Tabela 4. 15: Dados da geometria da seção transversal das pilhas

Item	Pilha - PC1	Pilha - PC2
Altura máxima da pilha (m)	60	70
Área ocupada (m <sup>2</sup> )	1218816	1218816
Comprimento da base (zona estrutural) (m)	300,0	300,0
Intervalo de altura da berma (m)	10,0	10,0
Largura da berma (m)	7,0	7,0
Inclinação Inter bancada	3,0H:1,0V	2,5H:1,0V
Largura do topo da zona estrutural (m)	30,0	11,0
Largura do dreno chaminé (m)	2,0	2,0
Inclinação do dreno chaminé	1,0H:1,0V	1,0H:1,0V
Espessura do sistema de vedação (m)	1,5	1,5

Fonte: Autor (2024)



(a)



(b)

Figura 4. 28: Seção transversal da pilha: (a) cenário PC1 (b) cenário PC2.

Fonte: Autor (2024)

A inclinação de 3,0H:1,0V foi adotada para a pilha de resíduo puro (cenário PC1) para evitar a ocorrência de erosões no talude. O resíduo de bauxita apresenta um intercepto coesivo efetivo nulo o que faz com que o material apresente susceptibilidade a erosões quando submetido a intempéries. Adicionalmente, esse material não apresenta muita resistência à água, perdendo a consistência e se desfazendo em menos de 24h. Este fato foi evidenciado em laboratório ao submeter o corpo de prova de resíduo de bauxita à imersão em água por 24h. Com bases nessas evidências e considerando a precipitação da região da ALUMAR, optou-se

por taludes mais abatidos nesse cenário. Foi adotado um dique de arranque pois as análises iniciais apresentaram uma fragilidade na região de contato entre a pilha e a interface de geomembrana. A geomembrana faz parte do sistema de vedação e drenagem a qual mantém contato direto com a fundação (Figura 4.31). Esse sistema segundo o relatório SLU-F-154641-001-R1(2023) é composto por cinco camadas:

- 1ª Camada:** composta por material argiloso compactado, representando uma camada natural de impermeabilização;
- 2ª Camada:** funciona como um sistema de detecção, composto por um tapete de areia e dispositivos para coleta e direcionamento da água;
- 3ª Camada:** funciona como uma segunda camada de impermeabilização, formada por uma camada de geocomposto bentonítico (GCL) instalada entre duas geomembranas PEAD de 1,5 mm;
- 4ª Camada:** funciona como proteção da geomembrana composta por argilas;
- 5ª Camada:** compõe a drenagem de fundo.

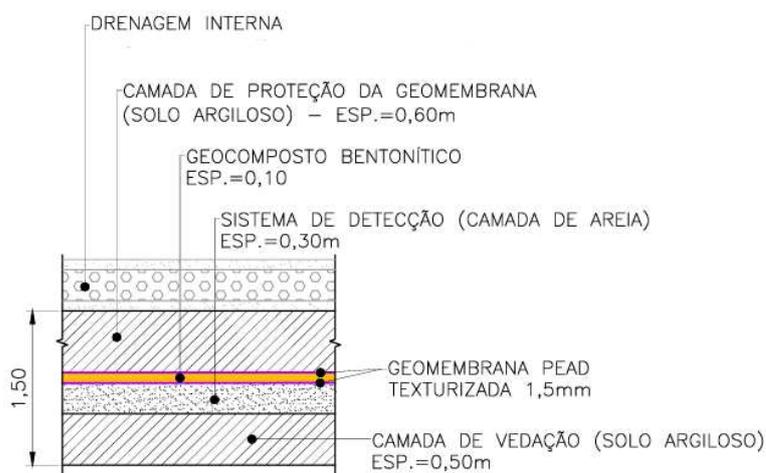


Figura 4. 29: Detalhe do sistema de vedação e drenage

Fonte: SLU-D-619465-001-R1 (2023)

No cenário PC2 o material melhorado permitiu a adoção de uma maior inclinação (2,5H:1,0V), pois com 2% de cimento o material passa apresentar maior resistência a erosões, devido à matriz cimentícia formada que liga as partículas entre si. A adição de 2% de cimento conferiu ao resíduo de bauxita um intercepto coesivo efetivo de 94,1kPa, tornando-o mais resistente à ação da água, permanecendo perfeitamente conservado após imersão de 24h. É importante ressaltar que, com base nas propriedades mecânicas do resíduo melhorado apresentadas anteriormente, existe a possibilidade de construção de pilhas com inclinações ainda superiores a 2,5H:1,0V. No entanto, inclinações maiores não são recomendadas pela

ALUMAR, pois inviabilizam as atividades operacionais. Dessa forma, foi definida para esse projeto uma inclinação de 2,5H:1,0V para o cenário PC2.

### 4.9.3 Parâmetros de resistência adotados

Os parâmetros geotécnicos usados para a zona estrutural dos dois cenários foram obtidos per meio de ensaios triaxiais desenvolvidos e exibidos no presente trabalho. Para o resíduo que compõe a zona não estrutural foram adotados os parâmetros geotécnicos apresentados no relatório n° SLU-F-154605-001-R1 (2023).

Com o intuito de aproximar ao máximo da situação de campo foram considerados os parâmetros de fundação da região de implantação da ARB 9. Os parâmetros geotécnicos dessa fundação foram definidos com base nos dados de investigações geotécnicas de campo e laboratório presentes no relatório n° SLU-F-014220-001 (2021). No relatório consta uma camada de areia fina siltosa e silte arenoso, ambas medianamente compactos, com NSPT variando majoritariamente entre 4 e 50. As camadas superficiais com NSPT inferior a 5 foram consideradas removidas nas análises. Foi adotado um nível freático de 1,5 m de profundidade em relação ao base da pilha. As características dos materiais empregados constam na Tabela 4.17.

Tabela 4. 16: Parâmetros adotados

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	Su (kPa)	Su/ $\sigma'v$
Resíduo Melhorado - Zona Estrutural	20	94,1	47,9	-	-
Resíduo Puro - Zona Estrutural	20	0	43,1	-	-
Resíduo - Zona interno	19	4	31	9	0,38
Dreno	19	0	32	-	-
Interface de geomembrana	20	0	17	-	-
Aterro compactado (Dique de arranque)	21	5	33	-	-
Solo Medianamente Compactado (fundação)	17,3	0	32	-	-
Solo Medianamente Compactado Saturado (fundação)	18,5	5	34	-	-
Solo Compactado (fundação)	18,5	5	34	-	-

Fonte: Autor (2024)

Como o resíduo da zona interna apresentou um comportamento contrátil, para condição não drenada foi utilizado o parâmetro de razão de resistência não drenada  $Su/\sigma'v$ . Afim de simular o excesso de poropressão desenvolvida na zona interno, foi considerado o parâmetro de poropressão ( $Ru$ ) na modelagem. O parâmetro  $Ru$  foi considerado variável ao longo do depósito, sendo maior na região mais confinada e menor à medida que se aproxima da superfície da pilha ou da fronteira drenante, elementos responsáveis pela dissipação de poropressões. Foram traçadas 6 isolinhas com valores de  $Ru$  que variam de 0 a 0,5. Não foi considerado o  $Ru$  na zona estrutural, pois assim como apresentado não seção 4.7, o resíduo que compões essa região apresentou um comportamento dilatante.

#### 4.9.4 Resultado das análises

Como pode ser observado na Tabela 4.18, os fatores de segurança encontrados foram todos superiores aos mínimos requeridos pela ABNT NBR 13.028 (2017) e pela ANCOLD (2019), considerando as condições de solicitação estática e pseudoestática. Mais detalhes dos resultados das análises executadas estão apresentados no Anexo C, nas Figuras C.1 a C.4.

Como base nos resultados obtidos, fica claro que para as condições e características analisadas, a estabilidade das pilhas estão garantidas. Nas situações em que foi considerado o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na modelagem da zona interna, notou-se muito pouca variação dos níveis de segurança, exceto no cenário PC2 na condição de solicitação sísmica – Ruptura Global, em que ocorreu uma redução de 10,91% no fator de segurança quando considerado parâmetro de poropressão. A redução do nível de segurança só ocorreu nessa situação, pois essa é a única situação em que boa parte das superfícies potenciais de ruptura passam pela zona interna. Apesar da redução, o nível de segurança permeou acima do exigido pela ABNT NBR 13028 (2017) e ANCOLD (2019). Dessa forma pode-se afirmar com base nas análises que na presente configuração de pilha de resíduo, o efeito da poropressão geradas no resíduo da zona interna pouco influencia no nível de segurança.

Tabela 4. 17: Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade

Condição	Fator de Segurança		
	Mínimo admissível	Resultado – cenário PC1	Resultado – cenário PC2
Final de Construção – Sem Ru – Ruptura Localizada	1,3	1,926	1,925
Final de Construção – Com Ru – Ruptura Localizada	1,3	1,926	1,925
Final de Construção – Sem Ru – Ruptura Global	1,3	2,288	2,494
Final de Construção – Com Ru – Ruptura Global	1,3	2,301	2,495
Solicitação Sísmica (0,131g) – Sem Ru – Ruptura Localizada	1,1	1,398	1,398
Solicitação Sísmica (0,131g) – Com Ru – Ruptura Localizada	1,1	1,398	1,398
Solicitação Sísmica (0,131g) – Sem Ru – Ruptura Global	1,1	1,399	1,503
Solicitação Sísmica (0,131g) – Com Ru – Ruptura Global	1,1	1,388	1,339

Fonte: Autor (2024)

Observando as Figuras C.1 a C.4 exibidas no Anexo C, constata-se que em todas as situações de ruptura localizada, as superfícies potenciais de ruptura ocorreram na região do dique de arranque, indicando que para as configurações adotadas, as zonas estruturais compostas tanto por resíduo puro como por resíduo melhorado não apresentam pontos de fragilidade.

#### 4.9.5 Impacto do uso do cimento na zona estrutural da pilha de resíduo

Nas configurações definidas para a pilha de resíduo do cenário PC1 e PC2, a aplicação da técnica de melhoramento de resíduo na zona estrutural resultou em alguns impactos como:

**a) Do ponto de vista econômico:**

No processo de melhoramento foi usado 2% de cimento. O volume de resíduo melhorado que compõe a zona estrutural do cenário PC2 é de  $31,39 \times 10^6 \text{ m}^3$  que equivale a  $64,07 \times 10^6 \text{ kg}$  de resíduo melhorado com cimento. Considerando que um saco de 50 kg de cimento Portland está custando em São Luiz – MA, em 2024, R\$ 42,90, a implementação da técnica de melhoramento de resíduo implicará em um gasto adicional de R\$ 1.099.462,91 em cimento para toda a zona estrutural da pilha. Ou seja, cada metro cúbico ganho implicou em um gasto de R\$ 0,18 em cimento.

**b) Do ponto de vista técnicos:**

Com os fatores de segurança obtidos das análises de estabilidade percebe-se que tanto a pilha de resíduo do cenário PC1 como a pilha de resíduo do cenário PC2 apresentaram um fator de segurança acima do exigido pela ABNT NBR 13028 (2017) e ANCOLD (2019). Contudo, nas situações de ruptura global, onde a superfície de ruptura passa na região estrutural composta por resíduo, percebe-se que os fatores de segurança foram menores para a pilha do cenário PC1. Isto se deve ao fato do resíduo cimentado ser mais resistente e estável que o resíduo puro, conforme exibido no item 4.7.2. Esse ganho de resistência possibilita a construção de pilhas mais altas e seguras, reduzindo desta forma o *footprint* das mineradoras, com a redução da necessidade de novas áreas de estocagem.

Conforme observado no item 4.7.3, a adição de 2% de cimento conferiu ao resíduo um intercepto coesivo efetivo de 94,1kPa, tornando-o mais resistente à ação da água, permanecendo perfeitamente conservado após imersão de 24h. De forma geral a aplicação do cimento torna o resíduo menos susceptível à erosão quando submetido à intempéries. Adicionalmente a melhoria nas propriedades geotécnicas do resíduo, resultado da matriz cimentícia formada que liga as partículas entre si, permite a construção de taludes menos abatidos de forma estável e segura. A construção de pilhas com taludes menos abatidos resulta num impacto direto na capacidade de estocagem das pilhas. É importante salientar que o resíduo melhorado possibilita a construção de pilhas com inclinações superiores a 2,5H:1,0V. No entanto, inclinações maiores não são compatíveis com as atividades operacionais desenvolvidas nos dias de hoje.

Com base nas configurações estabelecidas no item 4.9.2 para o cenário PC1 e PC2, foi calculado o ganho de volume obtido pela aplicação da técnica de melhoramento do resíduo de

bauxita. O cenário PC1 é capaz de receber um volume de  $47,75 \times 10^6 \text{ m}^3$  de resíduo. O cenário PC2 tem a capacidade para receber um volume de  $53,94 \times 10^6 \text{ m}^3$  de resíduo, representando um ganho de 11,48% no volume estocado. Para alcançar esse ganho de volume foi necessário  $0,63 \times 10^6 \text{ m}^3$  de cimento.

**c) Do ponto de vista ambiental:**

Conforme abordado no item 4.3 a adição de cimento proporciona uma barreira mecânica dentro da matriz cimentícia impedindo a lixiviação e solubilização de metais evitando sua liberação no meio ambiente. No presente estudo constatou-se uma redução significativa de metais como ferro (Fe) e Cromo (Cr) do extrato solubilizado. No entanto, autores como Hossein (2000), Marques, Rangel e Castro (2011), relataram que o uso de cimento Portland tem sido eficaz na redução da lixiviação de solos contaminados com elementos como As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag e Zn, além da imobilização de elementos tóxicos (Zhang *et al.*, 2021).

Conforme citado no item 2.5 a adição do cimento resulta na formação de uma matriz cimentícia que liga as partículas de resíduo entre si, reduzindo a presença de partículas soltas suscetíveis à ação do vento, mitigando dessa forma a formação de poeiras.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho surgiu com o objetivo principal de avaliar o comportamento do resíduo de mineração de bauxita melhorado com cimento Portland. A partir da análise dos resultados, pode-se afirmar que a pesquisa atingiu o objetivo proposto inicialmente.

- Com base nas análises das características físicas, observou-se que os resíduos depositados exibem variações físicas notáveis em lateral e profundidade. Partículas mais grossas acumulam-se próximo aos pontos de lançamento (*red sand*), enquanto as mais finas seguem o fluxo hidráulico, depositando-se em áreas distantes (*red mud*). Percebe-se uma variação com a profundidade, mas não revela um padrão consistente entre regiões. Quanto à mineralogia, os resíduos de bauxita analisados mostram poucas variações;
- Com base nos ensaios triaxiais, observou-se que o resíduo de bauxita compactado apresenta um modo de ruptura dúctil e uma tendência dilatante. O material demonstra um ângulo de atrito elevado, atingindo  $43,09^\circ$  no estado de pico e  $38,03^\circ$  no estado residual. Devido à natureza granular, a coesão do resíduo é aproximadamente nula, tanto no estado de pico quanto no pós-pico;
- Ao ser melhorado com cimento Portland em um ambiente controlado, o resíduo apresentou aumento nos parâmetros de resistência e rigidez. A adição de apenas 2% de cimento Portland resultou em um aumento médio de 33,6% na resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita. Esse aumento decorre do incremento no intercepto coesivo efetivo no estado de pico (de 0 kPa para 94,12 kPa) e do ângulo de atrito interno efetivo de pico (de  $43,09^\circ$  para  $47,95^\circ$ ). A tendência dilatante do material também aumentou com a adição do cimento. Por outro lado, o resíduo de bauxita melhorado e compactado exibiu um modo de ruptura frágil. Adicionalmente, constatou-se a eficiência do cimento Portland em encapsular metais como cromo (Cr) e ferro (Fe) no extrato solubilizado. Nos extratos lixiviados observou-se o encapsulamento eficiente de manganês (Mn) pela matriz cimentícia;
- Por meio dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, averiguou-se que o resíduo de bauxita, quando misturado com cimento Portland, apresenta aumento na resistência à compressão e tração. O índice porosidade/teor volumétrico de cimento demonstrou ser um parâmetro adequado para avaliar as melhorias nas propriedades mecânicas do resíduo, evidenciando que a redução da porosidade e o aumento do teor de cimento contribuem para a melhoria do comportamento geomecânico do material;
- Os resultados obtidos ao aplicar o método de Schnaid, Prietto e Consoli (2001) na estimativa da resistência ao cisalhamento do resíduo de bauxita mostram-se satisfatórios,

fornecendo resultados muito próximos à realidade, com base no erro associado. Ao empregar o método de Consoli (2014) e de Mitchell (1981), observou-se eficácia de ambos os métodos na previsão dos parâmetros totais obtidos por meio de ensaios triaxiais do tipo CIU, servindo como um estudo preliminar para uma compreensão inicial da ordem de grandeza dos parâmetros de resistência do resíduo de bauxita. No entanto, isso não substitui a necessidade de ensaios triaxiais subsequentes para resultados mais precisos no projeto;

- No âmbito econômico, a adição de 2% de cimento no resíduo que compõe a zona estrutural da pilha implica um gasto de R\$ 0,18 em cimento por cada metro cúbico adicional, nos cenários considerados. Contudo, do ponto de vista técnico, a adição de 2% de cimento proporcionou um ganho de 11,48% no volume estocado. Pois, permitiu a construção de taludes mais altos e menos abatidos, com inclinação igual ou superior a 2,5H:1,0V. Além disso, resultou em uma estrutura mais estável e resistente às intempéries e aos esforços solicitantes. Sob a ótica ambiental, essa adição promove o encapsulamento de metais e contaminantes. Adicionalmente reduz a presença de partículas soltas suscetíveis à ação do vento, mitigando a formação de poeiras.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho apresentou uma análise do comportamento mecânico e ambiental de um resíduo de bauxita através de distintos tipos de ensaios. De forma a complementar às análises iniciadas neste trabalho, são sugeridos os seguintes estudos:

- a) Executar uma pilha experimental de resíduo de bauxita cimentado;
- b) Estudar o comportamento geomecânico das demais frações do resíduo de bauxita;
- c) Avaliar o uso geopolímeros na estabilização de resíduo de bauxita;
- d) Realizar uma análise à luz da Teoria do Estado Crítico;
- e) Executar ensaios de compressão triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID) ou não drenado (CIU) no resíduo de bauxita puro e melhorado para altas tensões de confinamento (1000, 2000 e 4000 kPa).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Boletim técnico: Guia básico de utilização do cimento Portland.**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459, Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502, Rochas e solos – Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508, Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180, Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181, Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182, Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004, Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005, Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro.2004b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006, Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro. 2004c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007, Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro. 2004d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024, Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025, Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253, Solo-cimento – dosagem para emprego como camada de pavimento - procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028, Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13029, Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137, Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16605, Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697, Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16853, Solo — Ensaio de adensamento unidimensional.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Soil Cement.** Farmington Hills, 2009.

ÅHNBERG, Helen. **Strength of stabilised soils – a laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder.** Tese de doutorado. University of Lund, Lund, 2006.

ALAM, Shamshad; DAS, Sarat Kumar; RAO, B. Hanumantha. Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material. **Construction and Building Materials**, 2019

ALELVAN, G. M., Casagrande, M. D. T., & Consoli, N. C. Mechanical behavior analysis of polymer stabilized gold ore tailings. **Soils and Rocks**, 45(2), 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.28927/SR.2022.075421>>.

ALVES, Álvaro A. M. **Extração de Alumina – Uma Avaliação dos Parâmetros influentes.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

ALVES, Pedro I. A. **Empilhamento de resíduo filtrado: A expansão de uma alternativa para substituição de barragens.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ANCOLD – AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. **Tailings Dam Guidelines: Adopting International Direction.** Australia: ANCOLD, 2019.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 653, Standard terminology relating to soil, rock, and contained fluids.** USA: ASTM, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C837, Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay.** USA: ASTM, 2019.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2487, Standard test method for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system).** USA: ASTM, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4767, Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.** USA: ASTM, 2000.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4972, Standard Test Methods For pH of Soils**. USA: ASTM, 2019.

AUSTRALIA'S DEPARTMENT OF INDUSTRY, INNOVATION AND SCIENCE. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry. **Tailings Management**. Austrália, 2016.

BARRETO, Anelise Bueno Selbach. **Estudo do Encapsulamento de um Solo Contaminado com Cromo Utilizando Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

BEDIN, Jucélia. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxite**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BEDIN, Jucélia. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BERGADO, D. T.; MIURA, N.; ANDERSON, L. R.; BALASUBRAMANIAM, A. S. Soft ground improvement: in lowland and other environments. 1. ed. New York: ASCE Press, p. 427, 1996.

BLOIS, Michael. **Dry Stacking Tailings**. TAKRAF Group, Dever, 2016

BOTELHO, Marcos Ribeiro; FARIA, Mario Parreiras; MAYR, Carolina Tobias Retes; OLIVEIRA, Leandro Magno Gomes. Rompimento das barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão em Minas Gerais, Brasil: decisões organizacionais não tomadas e lições não aprendidas. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, 46, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2317-6369000018519>>.

BRAY, E. L. Mineral Commodity Summaries 2022. USGS, 2022. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>>. Acesso em: 27 fev. de 2022.

BRUSCHI, Giovani J. **Estabilização de resíduos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

BRUSCHI, Giovani J; FANTE, Fernando; ARAÚJO, Mariana Tonini; MACEDO, Gustavo Dias; RUVÉR, Cesar Alberto. Analysis of different failure criteria to evaluate bauxite tailings mechanical behavior through numerical modelling. **Soils and Rocks**, Vol 44, N. 1, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.28927/SR.2021.053720>>.

BRUSCHI, Giovani J.; SANTOS, Carolina Pereira; LEVANDOSKI, William Mateus Kubiaki; FERRAZZO, Suéllen Tonatto; KORF, Eduardo Pavan; SALDANHA, Rodrigo Beck; CONSOLI, Nilo Cesar. Leaching assessment of cemented bauxite tailings through wetting and drying cycles of durability test. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20031-5>>.

BRUSCHI, Giovani J, SANTOS, Carolina Pereira; MATTOS, João Rodrigo Guerreiro; CONSOLI, Nilo Cesar. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, Vol.32, p.100704, 2022b

BRUSCHI, Giovani J; SANTOS, Carolina Pereira; ARAÚJO, Mariana Tonini; FERRAZZO, Suéllen Tonatto; MARQUES, Sérgio Filipe Veloso; CONSOLI, Nilo Cesar. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of**

**Materials in Civil Engineering**, 2021. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003949](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003949)>

BRUSCHI, Giovanni J; SANTOS, Carolina Pereira; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; SILVA, Camila Martinatto; SCHULZ, Luana Rutz; SILVA, João Paulo de Sousa; CONSOLI, Nilo Cesar. Mechanical and Microstructural Response of Iron Ore Tailings under Low and High Pressures Considering a Wide Range of Molding Characteristics. **Mining**, 3(4), 712–730, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/mining3040039>>.

CARVALHO, João Vítor Azambuja; WAGNER, Alexia Cindy; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; CHAVES, Helder Mansur; SILVA, João Paulo Sousa; DELGADO, Bruno Guimarães; CONSOLI, Nilo Cesar. Evaluation of Strength Parameters for Application in Cemented Iron Ore Tailings Stacks. **Indian Geotechnical Journal**, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00712-9>>.

CASTILHO, Breno M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do germano**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CHANG, T., e WOODS, R. D. Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus. **Journal of Geotechnical Engineering**, 118(8), 1216–1233, 1992. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:8\(1216\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:8(1216))>

CHANG, Tzyy-Shiou, & WOODS, Richard D. Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of Geotech. Engineering*, 118, 1216-1233, 1992.

CHAVES, Helder. M. **Estudo Geotécnico de uma Pilha Experimental de Misturas Compactadas de Resíduo de Minério de Ferro Filtrado - Cimento Portland**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

CHAVES, L. R. C. Field and laboratory study of compacted filtered iron ore tailings-Portland cement blends for dry stacking purposes. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1680/jgeen.23.00097>>.

CHRONOLOGY of major tailings dam failures. **Wise Uranium Project**, 5 Feb 2024. Disponível em: <<https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acessado em 28, fevereiro de 2024.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Altera a Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. Resolução 460. Official Diary of the Union, Brasília, BR, Official Diary of the Union. 1, 2013.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; PRIETTO, P. D. M. Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 1, p. 96–101, Jan. 2003.

CONSOLI, N. C.; ROTTA, G. V.; PRIETTO, P. D. M. Yielding-compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress. **Géotechnique**, v. 56, n. 1, p. 69–72, 2006.

CONSOLI, Nilo Cesar; FOPPA, Diego; FESTUGATO, Lucas; HEINECK, Karla Salvagni. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, Nilo Cesar; CRUZ, Rodrigo Caberlon; FLOSS, Márcio Felipe; FESTUGATO, Lucas. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 5, p. 759–763, 2010.

CONSOLI, Nilo Cesar; ROSA, Daniela Aliati; CRUZ, Rodrigo Caberlon; ROSA, Amanda Dalla. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. **Engineering Geology**, v. 122, n. 3, p. 328–333, 2011.

CONSOLI, Nilo Cesar; FONSECA, António Viana; CRUZ, Rodrigo Caberlon; SILVA, Sara Rios. Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 137(11), 1126–1131, 2011. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000524](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000524)>.

CONSOLI, Nilo Cesar; FONSECA, António Viana; CRUZ, Rodrigo Caberlon; HEINECK, Karla Salvagni. Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. **Géotechnique**, v. 62, n. 2, p. 177–183, 2012.

CONSOLI, Nilo Cesar; FESTUGATO, Lucas; ROCHA, Cecília Gravina; CRUZ, Rodrigo Caberlon. Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: influence of types of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 591–597, 2013.

CONSOLI, Nilo Cesar. A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented Sandy soils. **Engineering Geology**, v. 169, n. 4, p. 61–68, 2014.

CONSOLI, Nilo Cesar; MARQUES, Sérgio Filipe Veloso; FLOSS, Márcio Felipe; FESTUGATO, Lucas. Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 7, 2017.

CONSOLI, Nilo Cesar; DAASSI-GLI, Cocou Auxence Pierre; RUVEN, Cesar Alberto; LOTERO, Andres; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; MONCALEANO, Cindy Johanna; LOURENÇO, David Eduardo. Lime-ground glass-sodium hydroxide as an enhanced sustainable binder stabilizing silica sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, 2021. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002624)>.

CONSOLI, Nilo Cesar; SILVANO, Lukas Wereszko ; LOTERO, Andres; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; MONCALEANO, Cindy Johanna; CRISTELO, Nuno. Key parameters establishing alkali activation effects on stabilized rammed Earth. **Construction and Building Materials**, v. 345, p.128299, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128299>>.

CONSOLI, N. C., Rocha, C.G., & Silvani, C. Effect of Curing Temperature on the Strength of Sand, Coal Fly Ash, and Lime Blends. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 26(8), 2014. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001011](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001011)>.

CONSOLI, Nilo Cesar; TOMASI, Lennon Ferreira; MARQUES, Sérgio Filipe Veloso. Cement-Enhancing Mechanical Behavior of Tailings Behind Upstream Tailings Dam for Safe Decommissioning. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 35 Issue 5, May 2023. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004741)>.

CONSOLI, Nilo Cesar; SERVI, Saymon; LOTERO, Andres; SILVA, João Paulo Sousa; BASTOS, Cezar. Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and**

**Building Materials**, v. 349, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>>.

CONSOLI, Nilo Cesar; VOGT, Jordanna Chamon; SILVA, João Paulo Sousa; CHAVES, Helder Mansur; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; MOREIRA, Eclesieter Batista; LOTERO, Andres. Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: new brazilian trend for tailings disposal by stacking. **Applied Sciences**, v. 12, jan. 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/app12020836>>.

CONSOLI, Nilo Cesar, *et al.* Response of Artificially Cemented Iron Ore Tailings for Dry Stacking Disposal over a Wide Range of Stresses. **Indian Geotechnical Journal**, 10 de jan. 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/s40098-023-00711-w>.

CONSOLI, Nilo Cesar; MAFESSOLI, Maiki; MARQUES, Sérgio Filipe Veloso; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100704>>.

CONSOLI, Nilo Cesar; ALELVAN, Giovanna Monique; CASAGRANDE, Michéle. Mechanical behavior analysis of polymer stabilized gold ore tailings. **Soils and Rocks**, v. 45, N. 2, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.28927/SR.2022.075421>>.

CONSOLI, Nilo Cesar; CARVALHO, João Vítor de Azambuja; WAGNER, Alexia Cindy; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; CHAVES, Helder Mansur; SILVA, João Paulo Sousa; DELGADO, Bruno Guimarães. Evaluation of Strength Parameters for Application in Cemented Iron Ore Tailings. **Indian Geotechnical Journal**, 53, pages775–788, 08 de fev. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40098-023-00712-9>>.

CONSOLI, Nilo Cesar; CARVALHO, João Vítor de Azambuja; WAGNER, Alexia Cindy; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; SILVA, João Paulo Sousa; CARVALHO, Inácio; CACCIARI, Pedro Pazzoto. Determination of critical state line (CSL) for silty-sandy iron ore tailings subjected to low-high confining pressures. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.014>>.

COOP, M.R., ATKINSON, J.H. The mechanics of cemented carbonate sands. **Géotechnique**, London, v. 43, n. 1. P. 53-67, 1993.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Braga, 2001.

CRISTELO, Nuno; COELHO, João; OLIVEIRA, Mafalda; CONSOLI, Nilo Cesar; PALOMO, Ángel; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana. Recycling and Application of Mine Tailings in Alkali-Activated Cements and Mortars—Strength Development and Environmental Assessment. **Applied Sciences**, v. 10, mar. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app10062084>>.

CRYSTAL, C., CHORE, C., EZAMA, I. Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: Proceedings Tailings and Mine Waste 2018. Keystone, Colorado, EUA. Anais[...] Colorado, p. 209-219, 2018.

DARONCO, João V.L. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduo melhorado com cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

DAVIES, Michael. **Filtered dry stacked tailings – The fundamentals**. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, 2011.

DAVIES, Michael; MUSSE, Marcelo; MCROBERTS, Ed. **Dewatered tailings practice - Trends and observations**. AMEC Earth & Environmental, 2011.

DASS, R. N. Tensile Stress-Strain Characteristics of Lightly Cemented Sand. **Geotechnical Testing Journal**, GTJODJ, Vol. 17, Issue 3, 1994.

DIAMBRA, A. Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand. **Soils and Foundations**, 58(1), 199–211, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.011>>.

DING, Xuhan; LUO, Zhenmin; XU, Guang; CHANG, Ping. Characterization of red sand dust pollution control performance via static and dynamic laboratorial experiments when applying polymer stabilizers. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13169-1>>.

DING, Xuhan; XU, Guang; LIU, Wei Victor; YANG, Leon; ALBIJANIC, Boris. Effect of polymer stabilizers' viscosity on red sand structure strength and dust pollution resistance. **Powder Technology**, 352, 117–125, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.046>>.

DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

EVANS, Ken. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. **The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)**, 2016.

FARENZENA, Helena P; BRUSCHI, Giovani Jordi; MEDINA, Guilherme Schmitt; SILVA, João Paulo de Sousa; LOTERO, Andres; CONSOLI, Nilo Cesar. Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: Mechanical and microstructural insights. **Canadian Geotechnical Journal**, 2024.

FELT, E. J. **Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures**. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association: Bulletin D5. Authorized Reprint from Bulletin 108 of the Highway Research Board, 138p, 1955.

FERRAZZO, Suéllen Tonatto; ARAÚJO, Mariana Tonini; BRUSCHI, Giovani Jordi; CHAVES, Helder Mansur; KORF, Eduardo Pavan; CONSOLI, Nilo Cesar. Mechanical and environmental behavior of waste foundry sand stabilized with alkali-activated sugar cane bagasse ash-eggshell lime binder. **Construction and Building Materials**, 383, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131313>>.

FERRAZZO, Suéllen Tonatto; ARAÚJO, Mariana Tonini; BRUSCHI, Giovani Jordi; CHAVES, Helder Mansur; KORF, Eduardo Pavan; LEVANDOSKI, William Mateus Kubiaki; SANTOS, Carolina Pereira; CONSOLI, Nilo Cesar. Metal encapsulation of waste foundry sand stabilized with alkali-activated binder: Batch and column leaching tests. **Journal of Environmental Management**, 348, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119287>>.

FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; MAFESSOLI, Maiki; MARQUES, Sérgio Filipe Veloso; CONSOLI, Nilo Cesar. Response of Artificially Cemented Iron Ore Tailings for Dry Stacking

Disposal over a Wide Range of Stresses. **Indian Geotechnical Journal**, Vol 53, p.904–915, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40098-023-00711-w>>.

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FOURIE, Andy; VERDUGO, Ramon; BJELKEVIK, Annika; TORRES-CRUZ, Luis Alberto; ZNIDARCIC, Dobroslav. Geotechnics of mine tailings: a 2022 State of the Art. **Australian Geomechanics Society**, Sydney, Australia, 2022.

FREITAS, Carlos Machado; BARCELLOS, Christovam; ASMUS, Carmen Ildes Rodrigues Fróes; SILVA, Mariano Andrade; XAVIER, Diego Ricardo. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Espaço temático: mineração e desastres ambientais**, Cad. Saúde Pública 35 (5), 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-311X00052519>>.

FURNELL, Erin; BILANIUK, Ksenia; GOLDBAUM, Matthew; SHOAB, Mohammed; WANI, Omar; TIAN, Xinyi; CHEN, Zhirong; BOUCHER, Darryel; BOBICKI, Erin Rae. Dewatered and Stacked Mine Tailings: A Review. **ACS ES and T Engineering**, Vol. 2, Issue 5, pp. 728–745, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00480>>.

Gomes, R. B., Tomi, G., & Assis, P. S. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, 5(4), 339–344, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.008>>.

GONÇALVES, Rodrigues Santos Maciel. **Comportamento geomecânico de rejeito de bauxita sob diferentes condições de confinamento e carregamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GORE, Matthew Stephen. Geotechnical Characterization of Bauxite Residue (Red Mud). Dissertação de Mestrado. The University of Texas, Austin, 2015.

GOU, Mifeng, ZHOU, Longfei, GUAN, Xuemao. Hydration kinetics of cement-calcined activated bauxite tailings composite Binder. **Construction & building materials**, Vol.301, p.124296, Article 124296, 2021.

HE, Jian; ZHANG, Jianhong; YU, Yuzhen; ZHANG, Guoping. The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. **Construction and Building Materials**, Vol. 30, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.011>>.

HEIKKINEN, P. M; NORAS P. & SALMINEN R. Environmental Techniques for the Extractive Industry: Mine closure handbook. **Geological Society of Finland**, Finland, 2008.

HILDEBRANDO, Edemarino Araujo; SOUZA, José Antônio da Silva; ANGÉLICA, Rômulo Simões; NEVES, Roberto de Freitas. Application of bauxite waste from amazon region in the heavy clay industry. **Materials Research**, 16(6), 1418–1422, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000145>>.

HORPIBULSUK, Suksun; RACHAN, Runglawan; CHINKULKIJNIWAT, Avirut; RAKSACHON, Yuttana; SUDDEEPPONG, Apichat. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. **Construction and Building**

**Materials** v. 24(10), p. 2011-2021, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>>.

IAI, International Aluminium Institute. **Unpublished Statistics on Bauxite Residue Production and Management**. 2020. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 15 de nov. de 2022.

IAI, International Aluminium Institute. **Technology Roadmap – Maximizing the use of Bauxite Residue in Cement**. 2020. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 15 de nov. de 2022.

IAI, International Aluminium Institute. **Bauxite Residue An Introduction Factsheet**. 2022. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 15 de nov. de 2022.

IAI, International Aluminium Institute. **Sustainable Bauxite Residue Management Guidance**. 2022. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 15 de nov de 2022.

IAI, International Aluminium Institute. **Sustainable Bauxite Mining Guidelines**. 2022. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 15 de nov de 2023.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório anual de atividade**. IBRAM, Brasília, 2021.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e manejo de resíduos da mineração**. IBRAM, Brasília, 2016

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. Soil stabilization: principles and practice. 1. ed. Sydney, Australia: Butterworths, 1972.

JAFARI, Mohammadamin e GRABINSKY, Murray. Coefficient of At-Rest Earth Pressure of Cemented Nonplastic Mine Tailings. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 149, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11239>>.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W.; ZIMMERMAN, R. W. **Fundamentals of rock mechanics**, 4th edition, Australia, Blackwell Publishers, 2007.

JITSANGIAM, Peerapong. **Performance, Evaluation, and Enhancement of Red Sand for Road Bases, Embankments, and Seawall Fills**. Tese de Doutorado. Universidade de Tecnologia de Curtin, 2007.

KARIM, Mohammad Emdadul; RAHMAN, Mizanur; KARIM, Rajibul; FOURIE, Andy B.; REID, David. Characteristics of Copper Tailings in Direct Simple Shearing: A Critical State Approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 149(5), 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1061/jggefkg.teng-11031>>.

KUMAR, Anuj & KUMAR, Sanjay. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. **Construction and Building Materials**, Vol. 38, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013>>.

LADE, Poul V. & TRADS, Niels. The role of cementation in the behaviour of cemented soils. **Geotechnical Research**, Vol. 1, Issue 4, p. 109-152, 2014.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LIAO, Jianguo; RUAN, Wenqiang; GU, Xinqi; MO, Jiajia; CAI, Mengmeng; GUO, Wenjie; LI, Fengheng; ZHU, Yu; MA, Xiaoe. Effects of bauxite tailings and sodium silicate on mechanical properties and hydration mechanism of magnesium phosphate cement. *Construction & building materials*, Vol.366, p.130055, Article 130055, 2023.

LIMA, Mayara S.S. & THIVES, Liseane P. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119894>>.

LIMA, B. M. Mechanical Behavior of a Granular Soil Stabilized with Alkali-Activated Waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 36(1), 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-15641>>.

LIU, Renzhi; LIU, Jing; ZHANG, Zhijiao; BORTHWICK, Alistair; ZHANG, Ke. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in Guanting reservoir Watershed, Zhangjiakou city, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph121214983>>.

LIU, Dong-Yan, WU, Chuan-Sheng. Stockpiling and comprehensive utilization of red mud research progress. **Materials**, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma5071232>>.

LIU, Wanchao; CHEN, Xiangqing; LI, Wangxing; YU, Yanfen; YAN, Kun. Environmental assessment, management and utilization of red mud in China. **Journal of Cleaner Production**, Vol 8, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.080>>.

LUPO, J., HALL, J. **Dry Stack Tailings – Design Considerations**. AMEC Earth and Environmental, Englewood, CO, USA, 2010.

MACÊDO, Mirtes M. **Solos modificados com cimento - efeito no modulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MECHI, Andréa e SANCHES, Djalma L. **Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo**, Estudos Avançados 24 (68), 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142010000100016>>.

MAFESSOLI, Maiki. **Comportamento mecânico de um resíduo de minério de ferro estabilizado com cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Relatorio final: estudo e pesquisa para a elaboração de levantamento e de análises acerca da infraestrutura do transporte e da logística do setor mineral no brasil, assim como dos investimentos esperados no setor**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-4-competitividade-da-industria-mineral-brasileira/caderno-5-1/>>.

MOH, Z. C. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Board**, n. 86, 1965.

MOREIRA, Eclesielter Batista; BALDOVINO, Jair Arrieta; ROSE, Juliana Lundgren; IZZO, Ronaldo Luis dos Santos. Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement

ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 11(2), 369–378, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.015>>.

MOREIRA, Eclesielter Batista. **Capacidade de carga de fundações superficiais assentes sobre camada finita de solo cimentado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MORAIS, Fernanda Taysa de Castro. **desempenho de um empilhamento drenado de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ouro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MUNIZ, D. H. F., & OLIVEIRA-FILHO, C. E. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente, **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2006.

MURTHY, V. N. S. **Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering**. 1. ed. New York: CRC Press, 2002.

NEWSON, Tim; DYER, Tom; ADAM, Chris; SHARP, Sandra. Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 132(2), 143-151, 2006. Disponível em: < <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:2143>>.

NIERWINSKI, Helena Paula. **Caracterização e comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NIERWINSKI, Helena Paula. **Potencial de Liquefação de Resíduos de Mineração estimado através de Ensaios de Campo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PÉREZ-VILLAREJO, L.; CORPAS-IGLESIAS, F.A.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; ARTIAGA, R.; PASCUAL-COSP, J. **Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry**. *Construction and Building Materials*, Vol. 35, 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.133>>.

PORTES, Andréa M.C. **Avaliação da disposição de resíduos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PRIETTO, P. D. M. Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Artificialmente Cimentado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

PRODANOV, Cleber Cristiano, FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RACANELLI, Lêda de Azevedo; OLIVEIRA, Raíza Cavalcante; BRITO, Woshington da Silva; SOUZA, José Antônio da Silva. Use of bauxite washout reagent for the manufacture of geopolymer binders. **Revista Materia**, 25(1), 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0921>>.

REDDY, N. G., & Rao, B. H. Compaction and consolidation behaviour of untreated and treated waste of Indian red mud. **Geotechnical Research**, 5(2), 106–121, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00005>>.

RIBEIRO, L.F.M., PRESOTTI, E.S. & PEREIRA, E.L. Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. **Congresso brasileiro de geotecnia ambiental, regeo'2003**, 5. 2003, Porto Alegre.

RISSOLI, Ana Luisa Cesar; PEREIRA, Géssica Soares; MENDES, Anselmo José Coelho; FILHO, Hugo Carlos Scheuermann; CARVALHO, João Vítor de Azambuja; WAGNER, Alexia Cindy; SILVA, João Paulo de Sousa; CONSOLI, Nilo Cesar. Dry Stacking of Filtered Iron Ore Tailings: Comparing On-Field Performance of Two Drying Methods. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02689-x>>.

ROTTA, G. V.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; COOP, M. R.; GRAHAM, J. Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress. **Géotechnique**, Vol. 53, Issue 5, pp 493–501, 2003.

ROUT, S. K., SAHOO, T., & DAS, S. K. Design of tailing dam using red mud. **Central European Journal of Engineering**, 3(2), 316–328, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.2478/s13531-012-0056-7>>.

SALDANHA, R. B.; CONSOLI, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, p. 06015012, 2016. Disponível em: < [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001437)>.

SALDANHA, Rodrigo Beck; SCHEUERMANN FILHO, Hugo Carlos; RIBEIRO, José Luís Duarte; CONSOLI, Nilo Cesar. Modelling the influence of density, curing time, amounts of lime and sodium chloride on the durability of compacted geopolymers monolithic walls. **Construction and Building Materials**, 136, 65–72, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.023>>.

SALDANHA, Rodrigo Beck; CAICEDO, Andres Mauricio Lotero; de ARAÚJO, Mariana Tonini; SCHEUERMANN FILHO, Hugo Carlos; MONCALEANO, Cindy Johanna; SILVA, João Paulo Sousa; CONSOLI, Nilo Cesar. Potential use of iron ore tailings for binder production: A life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, 365, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130008>>.

SAMAL, Sneha; RAY, Ajoy K.; BANDOPADHYAY, Amitava. Characterization and microstructure observation of sintered red mud–fly ash mixtures at various elevated temperature. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 101, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.010>>

SAMPAIO, João Alves; ANDRADE, Mônica Calixto; DUTRA, Achilles Junqueira Boudort. **Rochas e Minerais Industriais: Bauxita**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2005.

SAMPAIO, João; ANDRADE, Mônica Calixto; DUTRA, Achilles Junqueira Boudort. **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: Bauxita**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, C.P. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, 32, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100704>>.

SILVA, Washington P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, João Paulo de Sousa; CARVALHO, João Vítor de Azambuja; WAGNER, Alexia Cindy; CACCIARI, Pedro Pazzoto; CONSOLI, Nilo Cesar. On the mechanics of filtered compacted consolidated and overconsolidated iron ore tailings at high pressures. **Canadian Geotechnical Journal**, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0056>>.

SILVA, João Paulo; CACCIARI, Pedro; TORRES, Vidal; RIBEIRO, Luís Fernando; ASSIS, André. Behavioural analysis of iron ore tailings through critical state soil mechanics. **Soils and Rocks**, 45(2), 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.28927/SR.2022.071921>>.

SCHEUERMANN FILHO, Hugo C. **Adjusted porosity/cement index: mechanical behavior and microstructure over a wide range of dosages**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. & Consoli, N. C. Effect of Porosity/Cement Index on Behavior of a Cemented Soil: The Role of Dosage Change. **Geotechnical and geological engineering**, 2023.

SCHNAID, F., PRIETTO, P. D. M., CONSOLI, N. C. Characterization of cemented sand in triaxial compression. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. 1.], v. 127, n. 10, p.857-868, 2001.

SCHNAID, Fernando; NIERWINSKI, Helena Paula; ODEBRECHT, Edgar; BEDIN, jucelia. On the Characterization and Classification of Bauxite Tailings. **Soils and Rocks**, 37(3), 277-284, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.28927/SR.373277>>.

SERVI, Saymon; LOTERO, Andres; SILVA, João Paulo Sousa; BASTOS, Cezar; CONSOLI, Nilo Cesar. Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. **Construction and Building Materials**, 349, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>>.

SLU-F-014220-001-R1 – **Elaboração de projeto básico civil/geotecnia da área de resíduo 9 - ARB 9: Consolidação das investigações geotécnicas de campo e laboratório**. ALUMAR, 2021.

SLU-F-014223-001-R2 – **Elaboração de projeto básico civil/geotecnia da área de resíduo 9 - ARB 9: Estudos geotécnicos – 1ª fase**. ALUMAR, 2021.

SLU-D-619465-001-R1 – **Next Residue Storage Solution: Arranjo geral – Pilhas de Rejeito**. ALUMAR, 2023.

SLU-F-154605-001-R1 – **Next Residue Storage Solution: Relatório de interpretação dos ensaios de laboratório para caracterização geotécnica dos resíduos do filtro prensa**. ALUMAR, 2023.

SLU-F-154641-001-R1 – **Next Residue Storage Solution: Memorial descritivo – pilha**. ALUMAR, 2023.

SOUZA, Thiago Coutinho. **Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

TSAKIRIDIS, P. E; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. **Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker**. Journal of Hazardous Materials, Vol. 116, Issues 1–2, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002>>

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004. 272 p.

VAN HORN, Kent R.; BRIDENBAUGH, Peter R.; STALEY, James T. **Aluminum processing**. Encyclopaedia Britannica, 2018. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/aluminum-processing/Ores>>.

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement Techniques and Their Evolution**. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1989.

VICK, S. G. Planning, design, and analysis of tailings dams. **BiTech**, Vancouver, B.C. Canada, 1990.

VICK, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

VILLAR, Lúcio Flavio de Souza; CAMPOS, Tacio Mauro Pereira; AZEVEDO, Roberto Francisco; ZORNBERG, Jorge Gabriel. **Influence of laboratory techniques on the geotechnical characterization of mining and industrial wastes**. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Alexandria), 2009. Disponível em: <<https://www.issmge.org/publications/publication/influence-of-laboratory-techniques-on-the-geotechnical-characterization-of-mining-and-industrial-wastes>>.

VU, T. H., & GOWRIPALAN, N. Mechanisms of heavy metal immobilisation using geopolymerisation techniques – A review. In **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 16, Issue 3, pp. 124–135, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3151/jact.16.124>>.

WANG, Lin; ZENG, Hua; LYU, Fei; SUN, Wei; ZHANG, Hai; WANG, Yanxiu. Progress on the Industrial Applications of Red Mud with a Focus on China. *Minerals*, 2020.

WHITEHURST, E. A. The stabilization of local base materials. Tennessee Department of Transportation; Highway Research Board, n. 1, p. 52, 1955.

ZENG, Hua; LYU, Fei; SUN, Wei; ZHANG, Hai; WANG, Li; WANG, Yanxiu. Progress on the Industrial Applications of Red Mud with a Focus on China. *Minerals*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/min10090773>>

ZHANG, Jizhe; LIU, Shengjie; YAO, Zhanyong; WU, Shaopeng; JIANG, Hongguang; LIANG, Ming; QIAO, Yaning. Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, Vol. 180, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.268>>.

ZHANG, Jizhe; YAO, Zhanyong; WANG, Kai; WANG, Fei; JIANG, Hongguang; LIANG, Ming; WEI, Jincheng; AIREY, Gordon. Sustainable utilization of bauxite residue (Red Mud) as a road material in pavements: A critical review. **Construction and Building Materials**, Vol. 270, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121419>>.

ZHANG, Jizhe; LI, Peizhao; WANG, Kai; MA, Chuanyi; LIANG, Ming; JIANG, Hongguang; YAO, Kai; SU, Chunhua; YAO, Zhanyong. Adhesive behavior and pavement performance of

asphalt mixtures incorporating red mud as a filler substitute. **Construction and Building Materials**, Vol. 298, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123855>

## **ANEXO**

## ANEXO A – GRÁFICOS DE PADRÃO DE DIFRAÇÃO – DRX

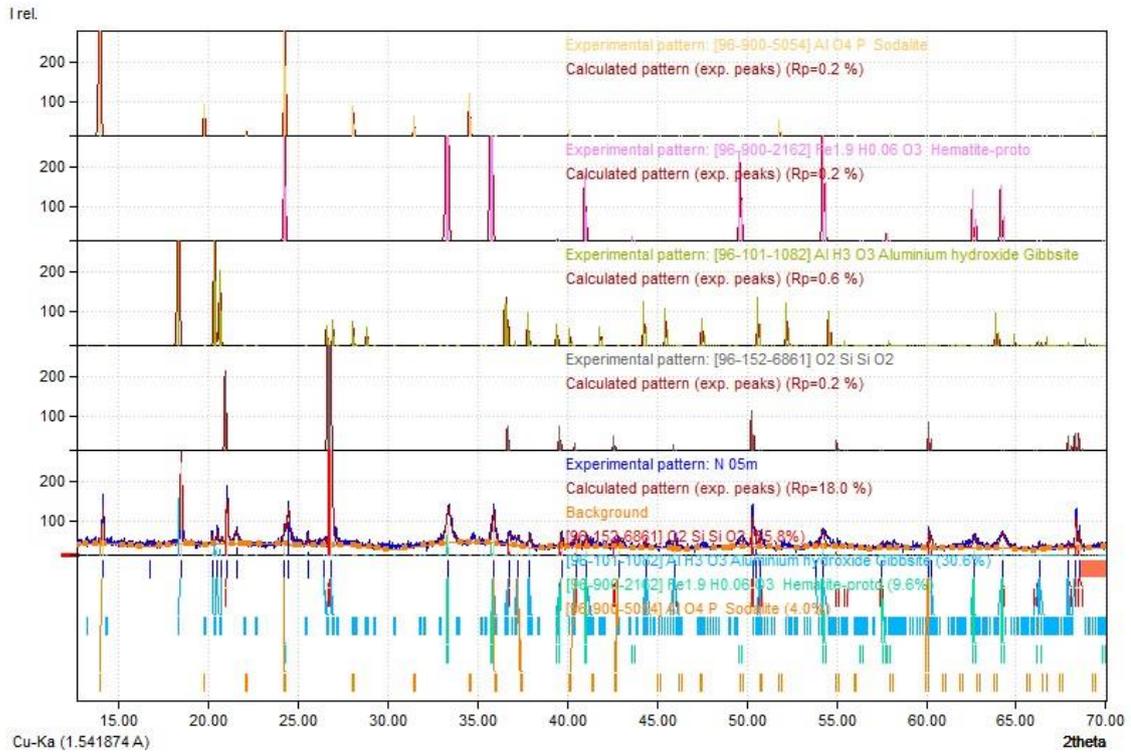


Figura A. 1: Gráficos de padrão de difração – Amostra Norte 0,5 m

Fonte: Autor (2024)

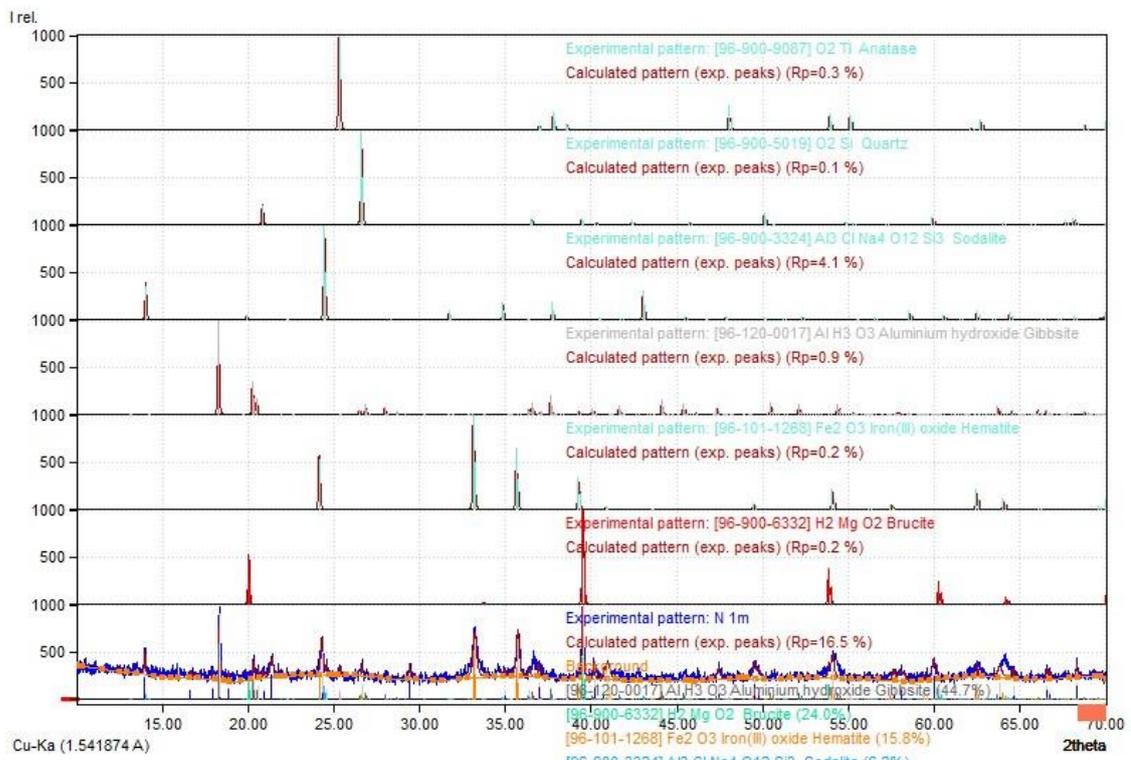


Figura A. 2: Gráficos de padrão de difração – Amostra Norte 1,0 m

Fonte: Autor (2024)

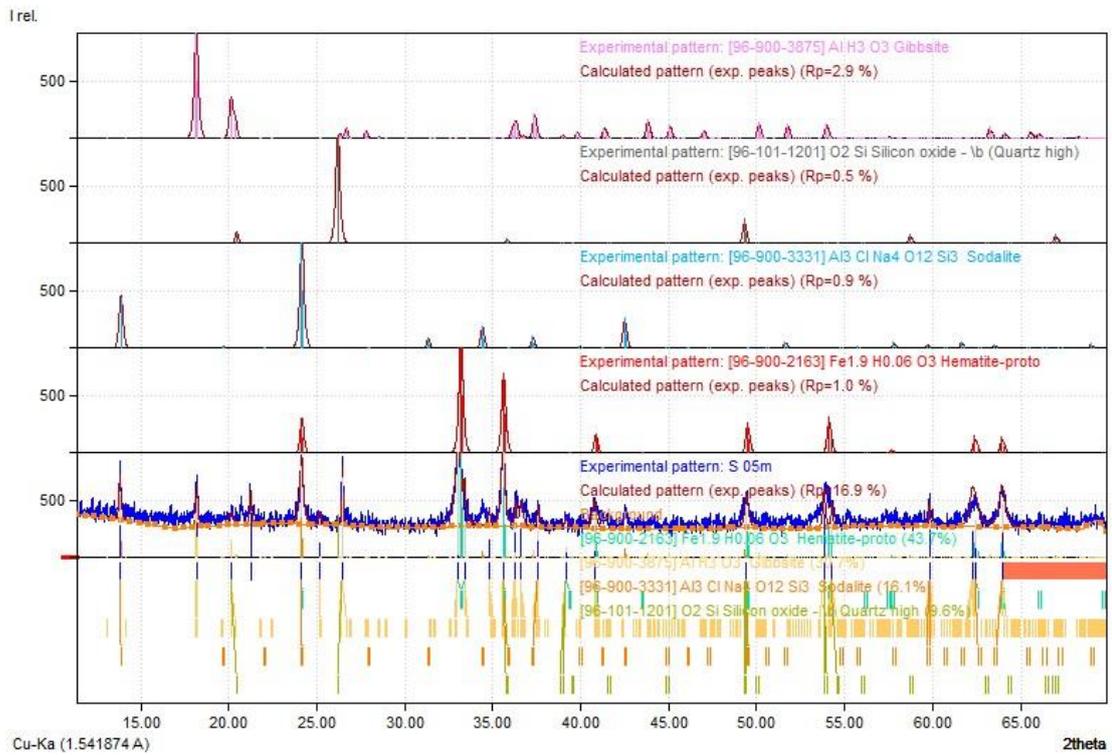


Figura A. 3: Gráficos de padrão de difração – Amostra Sul 0,5 m

Fonte: Autor (2024)

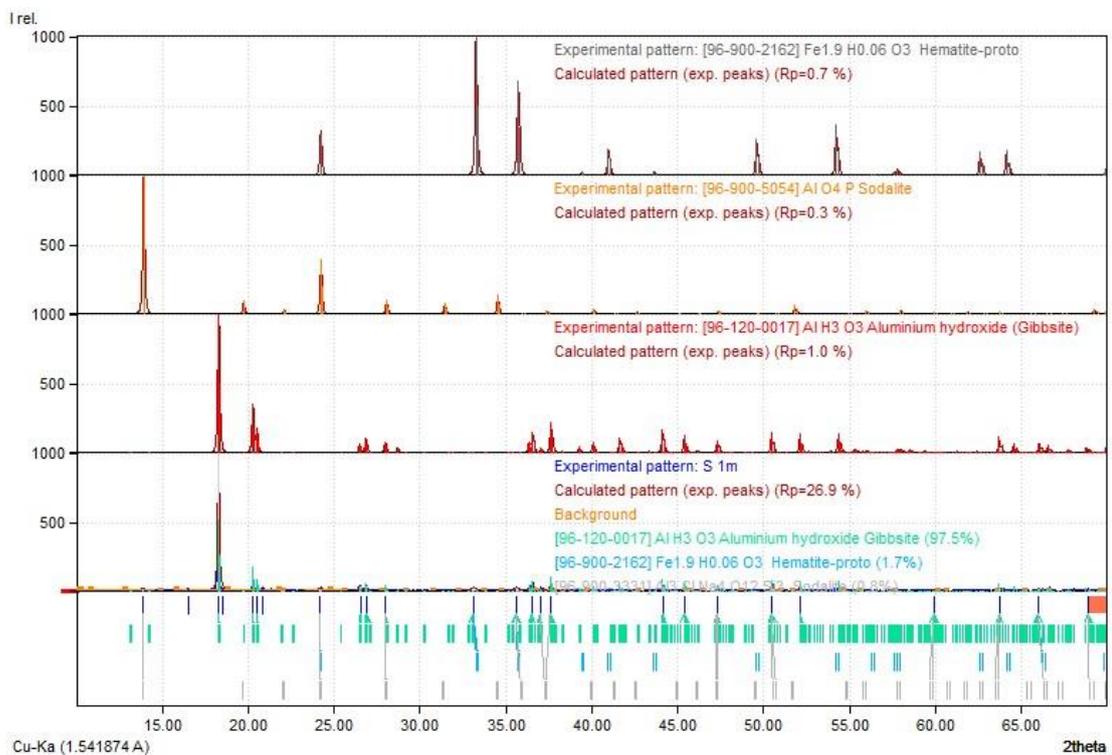


Figura A. 4: Gráficos de padrão de difração – Amostra Sul 1,0 m

Fonte: Autor (2024)

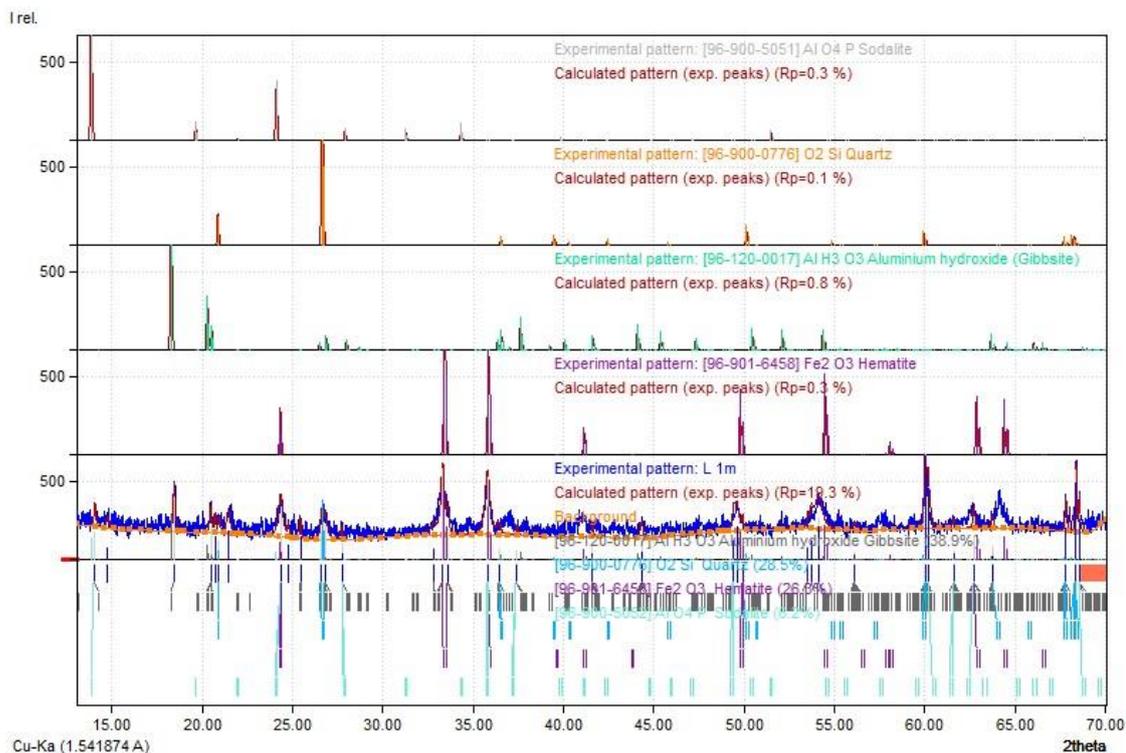


Figura A. 5: Gráficos de padrão de difração – Amostra Leste 0,5 m

Fonte: Autor (2024)

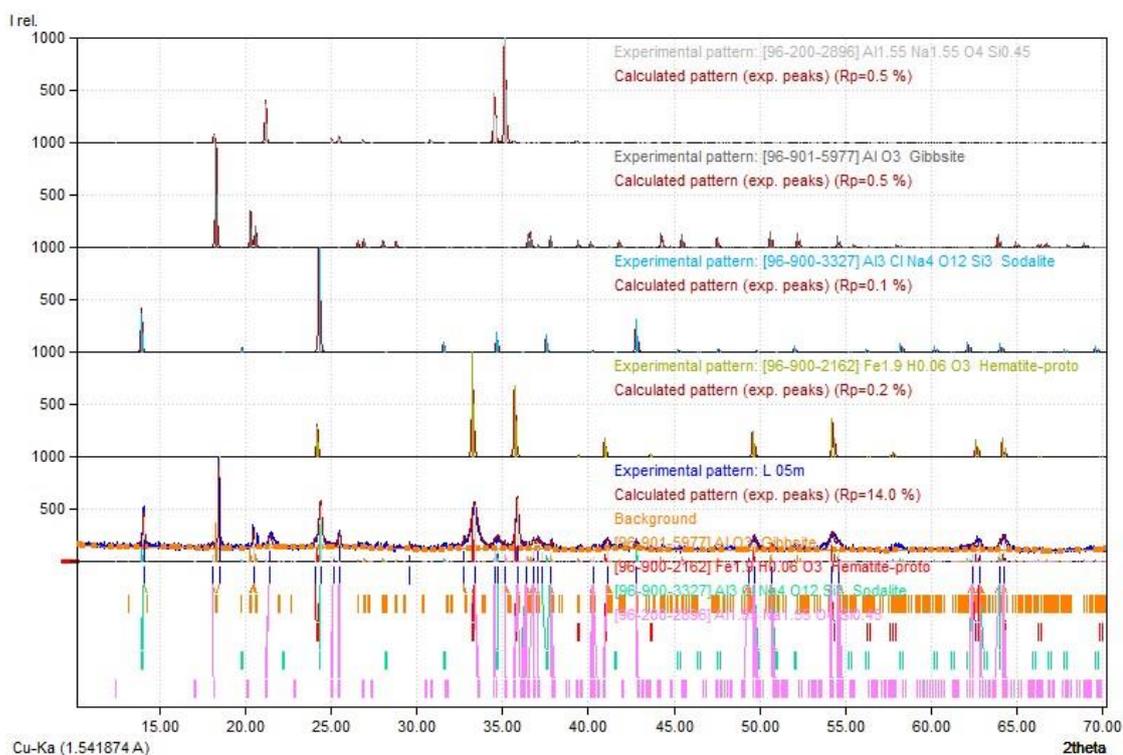


Figura A. 6: Gráficos de padrão de difração – Amostra Leste 1,0 m

Fonte: Autor (2024)

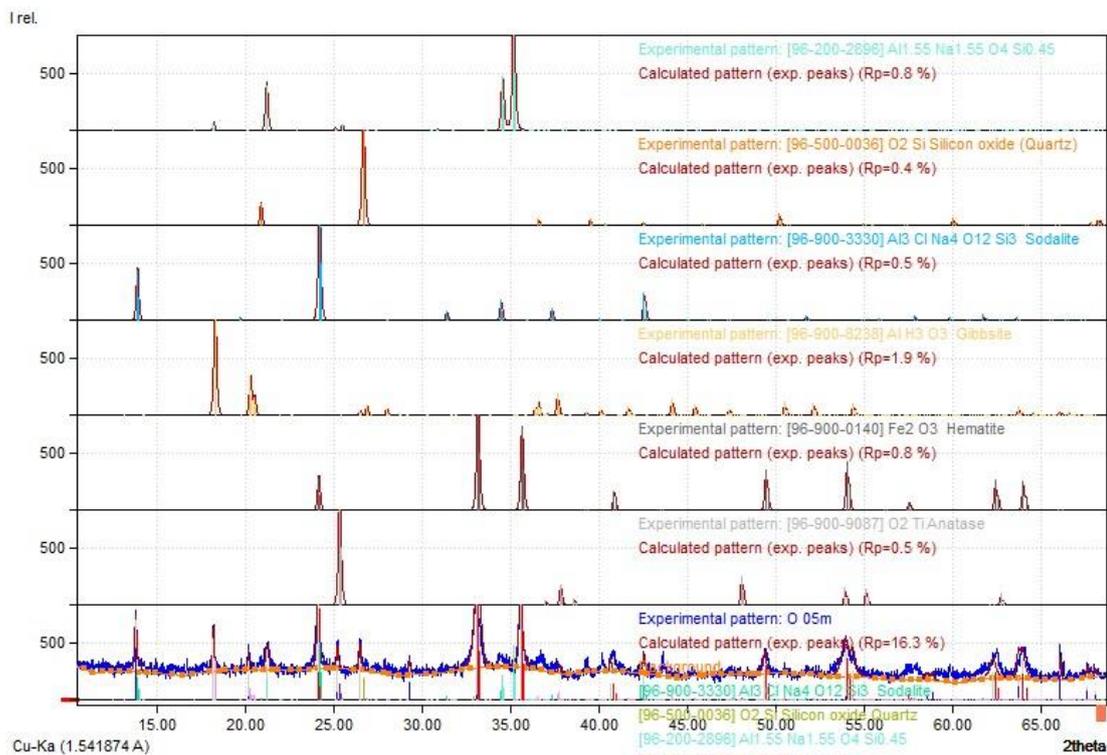


Figura A. 7: Gráficos de padrão de difração – Amostra Oeste 0,5 m

Fonte: Autor (2024)

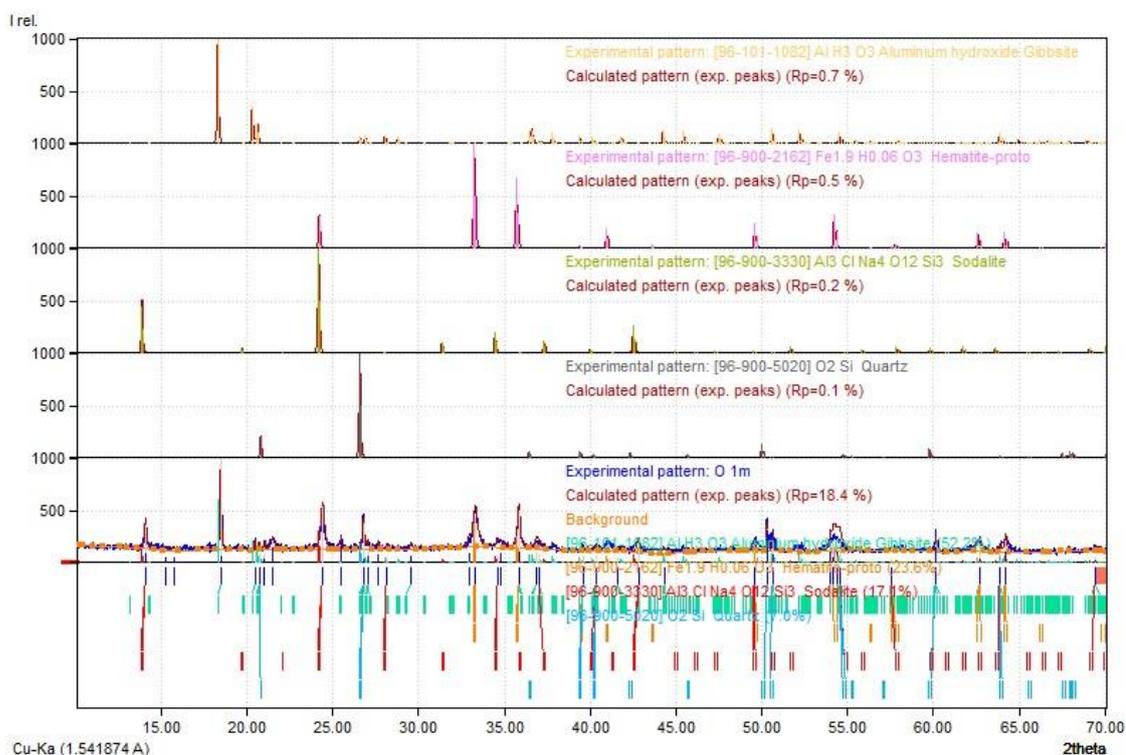


Figura A. 8: Gráficos de padrão de difração – Amostra Oeste 1,0 m

Fonte: Autor (2024)

ANEXO B – RESISTÊNCIAS A COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO POR  
COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela B. 1: Resultados de  $q_u$  para  $\gamma_d$  de 18, 19 e 20 kNm<sup>3</sup> e 7 dias de cura com teor de cimento variando em 2% 4% e 6%.

Amostra	$C_i$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$C_{iv}$ (%)	$\eta / C_{iv}$	$\eta / C_{iv}$ (média)	$q_u$ (kPa)
CP2-18as	2,00%	18,00	43,85	1,18	37,15		853,60
CP2-18bs	2,00%	18,04	43,70	1,10	39,59	38,90	916,17
CP2-18cs	2,00%	17,97	43,93	1,10	39,96		835,36
CP2-19as	2,00%	19,07	40,50	1,17	34,71		1274,88
CP2-19bs	2,00%	18,80	41,35	1,15	35,96	35,56	1483,16
CP2-19cs	2,00%	18,79	41,38	1,15	36,00		1099,44
CP2-20as	2,00%	19,75	38,39	1,21	31,78		1840,48
CP2-20bs	2,00%	19,71	38,51	1,21	31,94	31,92	1714,05
CP2-20cs	2,00%	19,69	38,57	1,20	32,02		2277,13
CP4-18as	4,00%	18,01	43,82	2,16	20,28		2739,82
CP4-18bs	4,00%	18,20	43,23	2,18	19,79	19,98	2790,08
CP4-18cs	4,00%	18,17	43,30	2,18	19,85		2534,04
CP4-19as	4,00%	18,92	40,96	2,27	18,04		3776,33
CP4-19bs	4,00%	18,95	40,87	2,27	17,97	17,90	3718,31
CP4-19cs	4,00%	19,07	40,51	2,29	17,70		3624,13
CP4-20as	4,00%	19,90	37,91	2,39	15,87		4251,01
CP4-20bs	4,00%	19,95	37,75	2,39	15,77	15,84	4395,03
CP4-20cs	4,00%	19,90	37,90	2,39	15,87		4537,11
CP6-18as	6,00%	18,29	42,95	3,23	13,30		4246,38
CP6-18bs	6,00%	18,03	43,76	3,18	13,75	13,54	3405,65
CP6-18cs	6,00%	18,13	43,43	3,20	13,56		4019,06
CP6-19as	6,00%	19,02	40,64	3,36	12,10		5743,76
CP6-19bs	6,00%	19,15	40,25	3,38	11,90	12,02	5582,84
CP6-19cs	6,00%	19,04	40,58	3,36	12,07		5686,82
CP6-20as	6,00%	19,96	37,72	3,53	10,70		8232,88
CP6-20bs	6,00%	20,00	37,59	3,53	10,64		8146,82
CP6-20cs	6,00%	19,93	37,83	3,52	10,75	10,70	7342,74

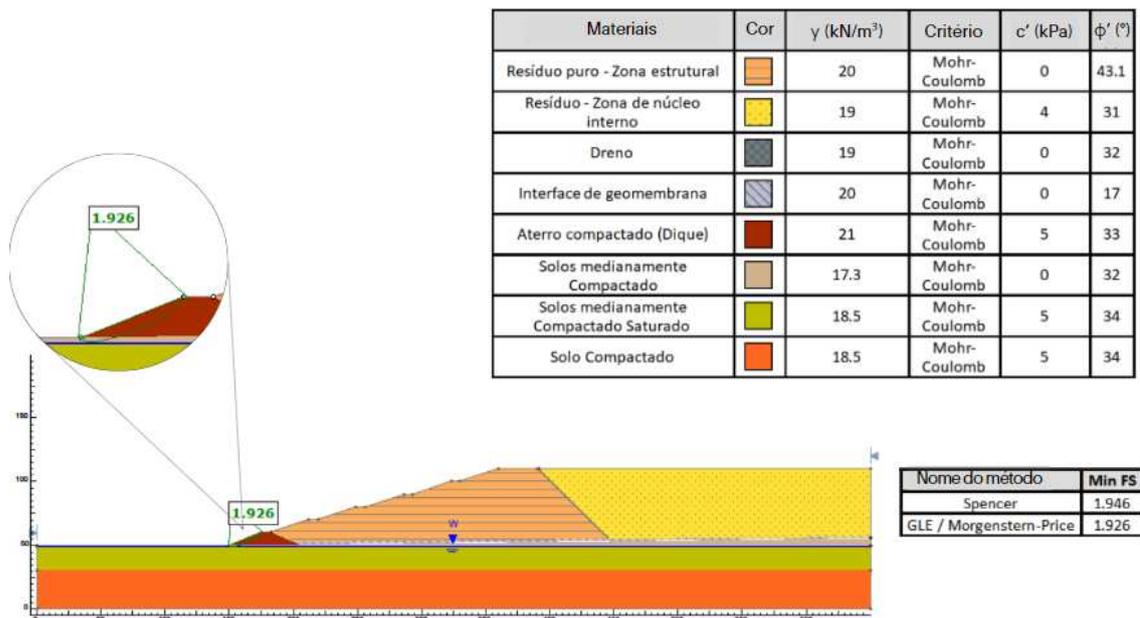
Fonte: Autor (2024)

Tabela B. 2: Resultados de  $q_t$  para  $\gamma_d$  de 18, 19 e 20 kNm<sup>3</sup> e 7 dias de cura com teor de cimento variando em 2% 4% e 6%.

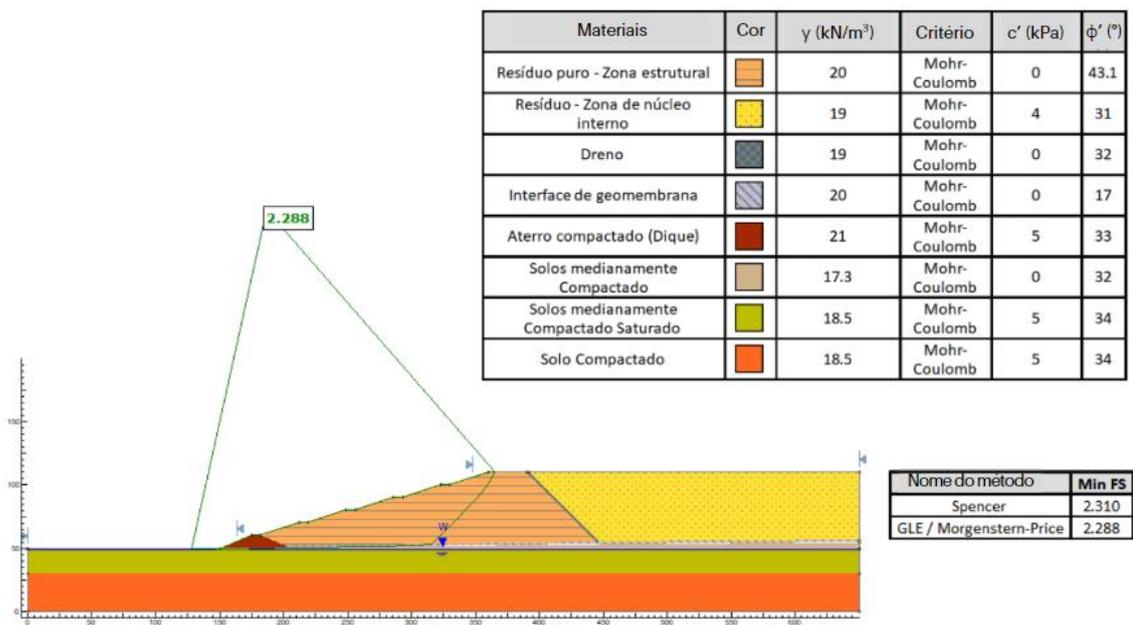
Amostra	$C_i$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\eta$ (%)	$C_{iv}$ (%)	$\eta / C_{iv}$	$\eta / C_{iv}$ (média)	$q_t$ (kPa)
CP2-18ad	2,00%	18,08	43,58	1,19	36,75		143,05
CP2-18bd	2,00%	17,92	44,10	1,10	40,24	38,69	127,01
CP2-18cd	2,00%	18,15	43,39	1,11	39,09		144,74
CP2-19ad	2,00%	18,82	41,30	1,15	35,88		197,07
CP2-19bd	2,00%	18,86	41,17	1,15	35,69	35,74	193,86
CP2-19cd	2,00%	18,87	41,14	1,15	35,64		190,98
CP2-20ad	2,00%	19,77	38,33	1,21	31,69		275,56
CP2-20bd	2,00%	19,72	38,49	1,21	31,91	31,83	284,29
CP2-20cd	2,00%	19,72	38,46	1,21	31,88		282,85
CP4-18ad	4,00%	17,98	43,89	2,16	20,34		350,87
CP4-18bd	4,00%	18,00	43,84	2,16	20,30	20,33	358,11
CP4-18cd	4,00%	17,98	43,90	2,16	20,34		345,89
CP4-19ad	4,00%	18,82	41,27	2,26	18,27		558,91
CP4-19bd	4,00%	18,87	41,14	2,26	18,18	18,17	530,82
CP4-19cd	4,00%	18,91	41,00	2,27	18,07		492,38
CP4-20ad	4,00%	19,80	38,24	2,38	16,10		631,82
CP4-20bd	4,00%	19,72	38,48	2,37	16,26	16,09	711,51
CP4-20cd	4,00%	19,89	37,96	2,39	15,91		690,19
CP6-18ad	6,00%	18,21	43,19	3,22	13,43		655,71
CP6-18bd	6,00%	17,99	43,86	3,18	13,80	13,66	606,37
CP6-18cd	6,00%	18,03	43,76	3,18	13,75		602,03
CP6-19ad	6,00%	18,91	41,01	3,34	12,28		768,79
CP6-19bd	6,00%	19,00	40,73	3,36	12,14	12,16	828,46
CP6-19cd	6,00%	19,05	40,57	3,36	12,06		759,04
CP6-20ad	6,00%	19,78	38,28	3,49	10,96		915,52
CP6-20bd	6,00%	19,77	38,32	3,49	10,98	10,89	1080,47
CP6-20cd	6,00%	19,95	37,77	3,52	10,72		1214,84

Fonte: Autor (2024)

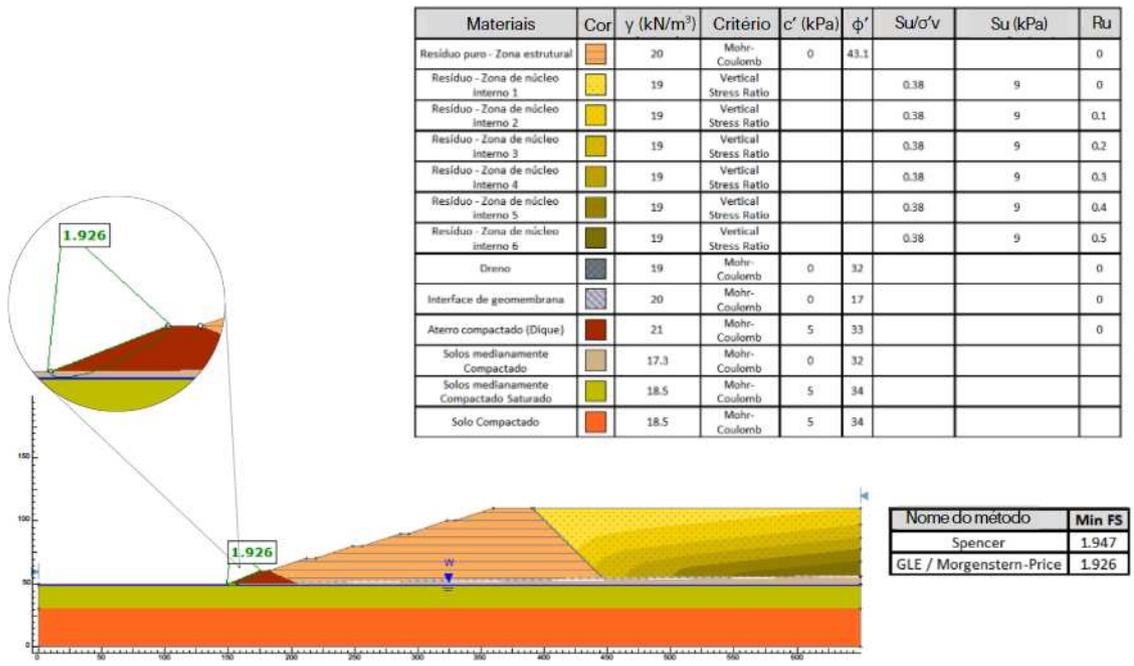
## ANEXO C –ANÁLISES DE ESTABILIDADE DAS PILHAS



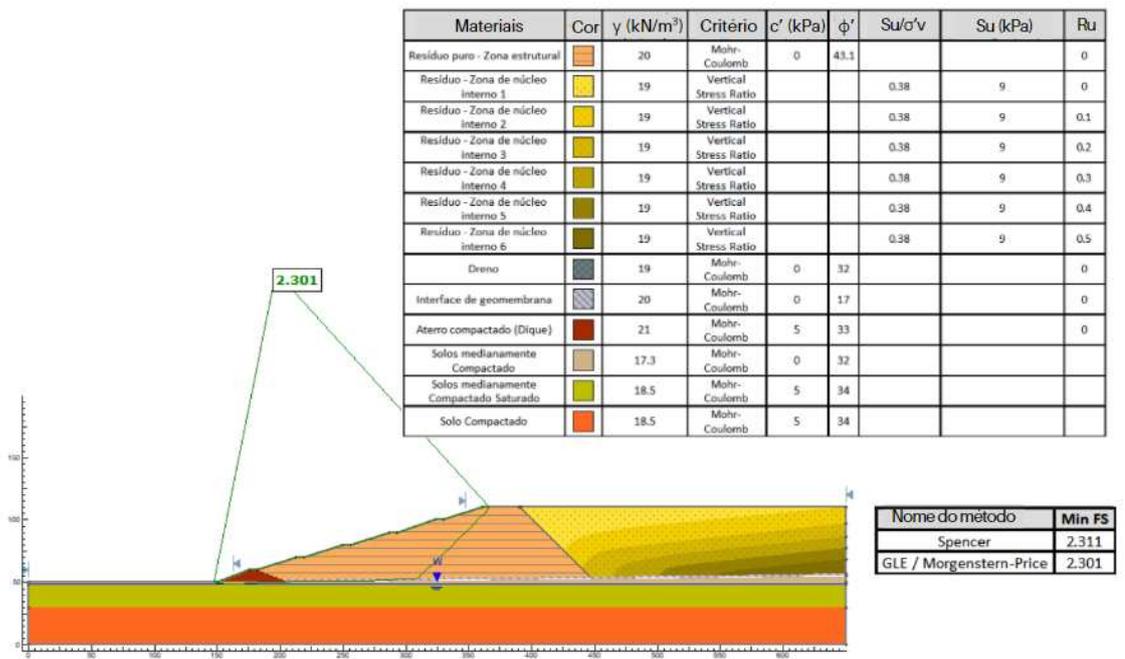
(a)



(b)



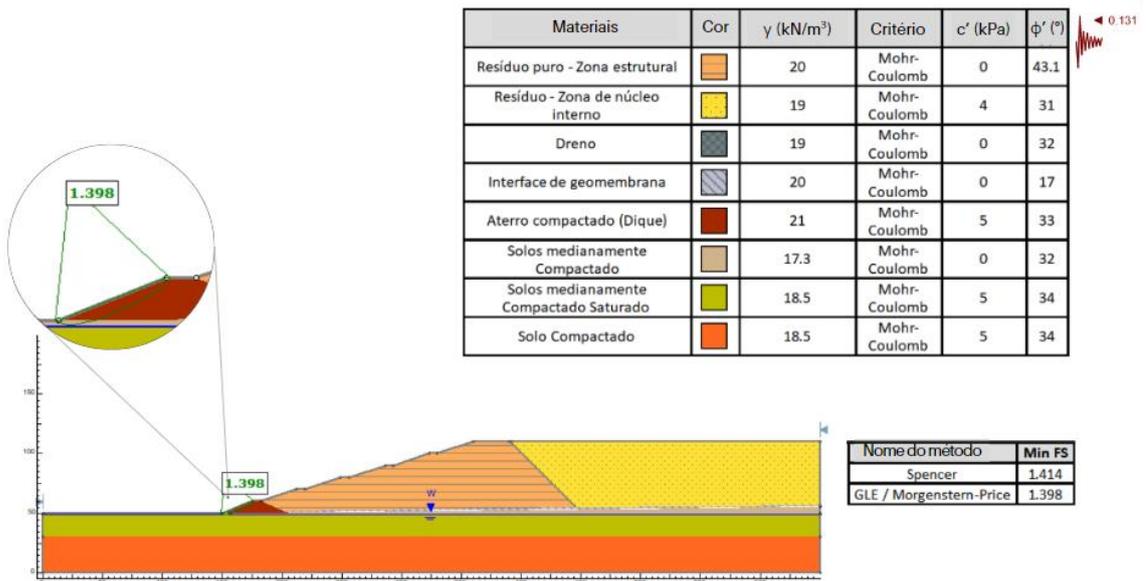
(c)



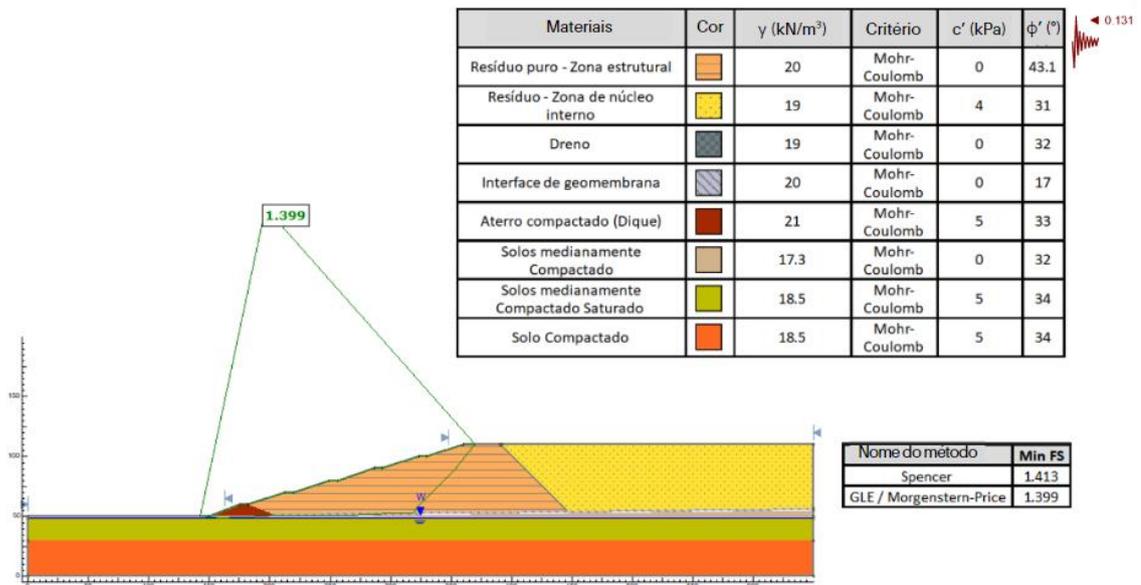
(d)

Figura C. 1: Cenário PC1 – Final de Constru o: (a) ruptura localizada sem  $R_u$ ; (b) ruptura global sem  $R_u$ ; (c) ruptura localizada com  $R_u$ ; (d) ruptura global com  $R_u$ .

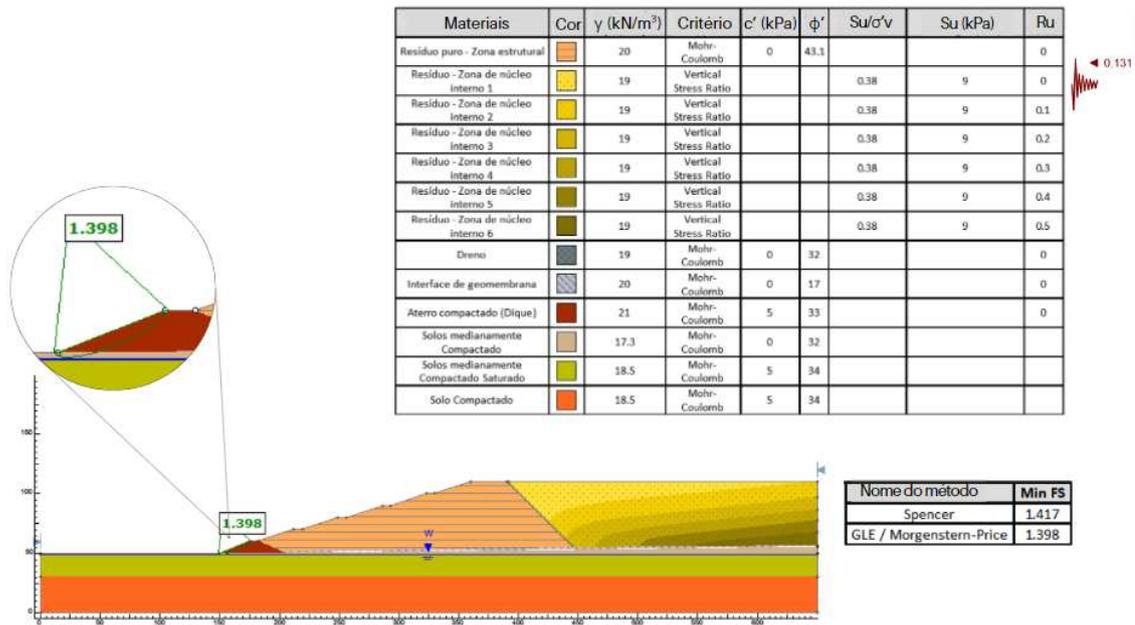
Fonte: Autor (2024)



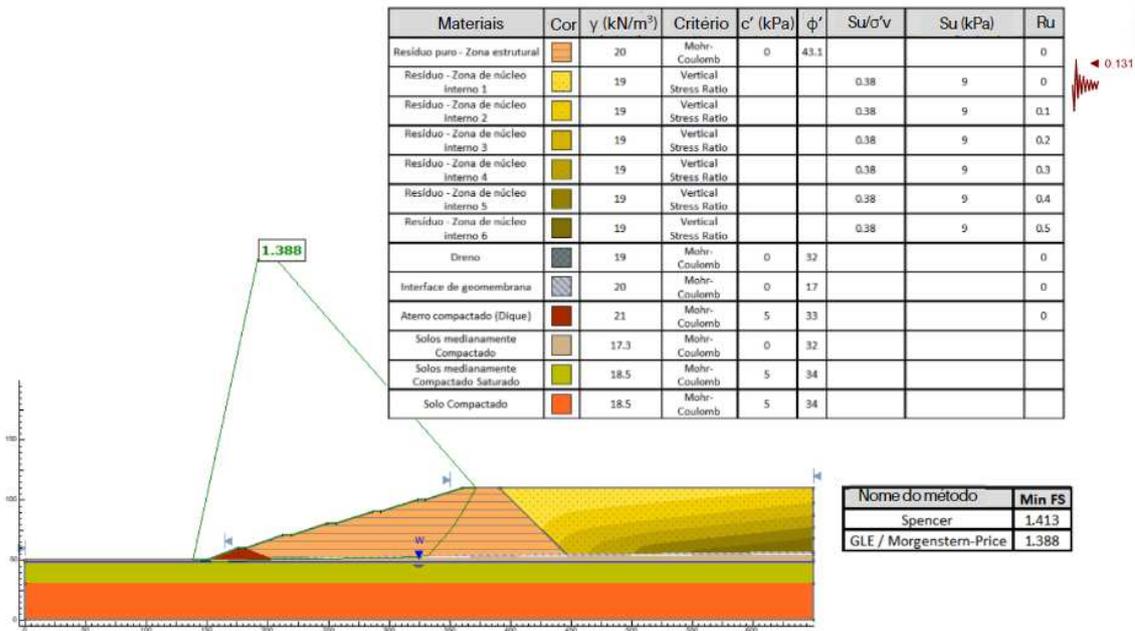
(a)



(b)



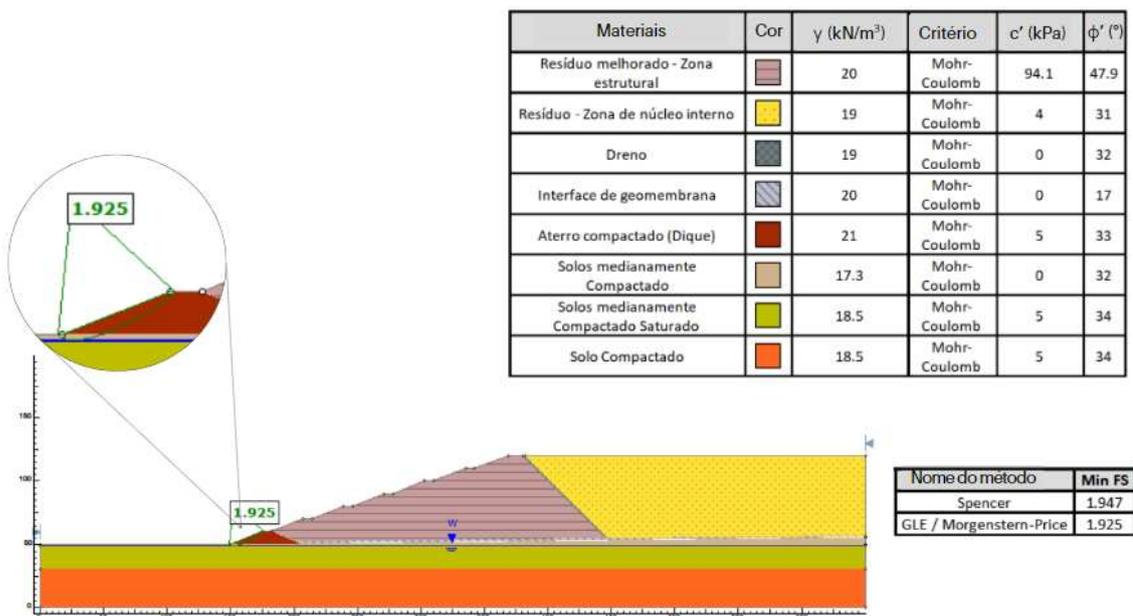
(c)



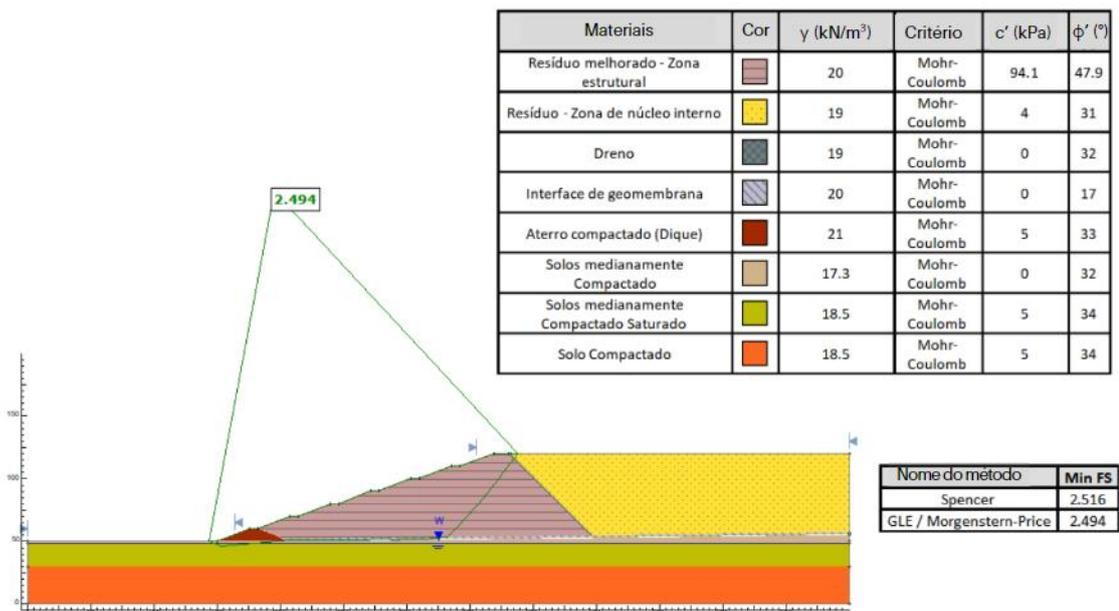
(d)

Figura C. 2: Cenário PC1 – Solicitação Sísmica (0,131g): (a) ruptura localizada sem  $R_u$ ; (b) ruptura global sem  $R_u$ ; (c) ruptura localizada com  $R_u$ ; (d) ruptura global com  $R_u$ .

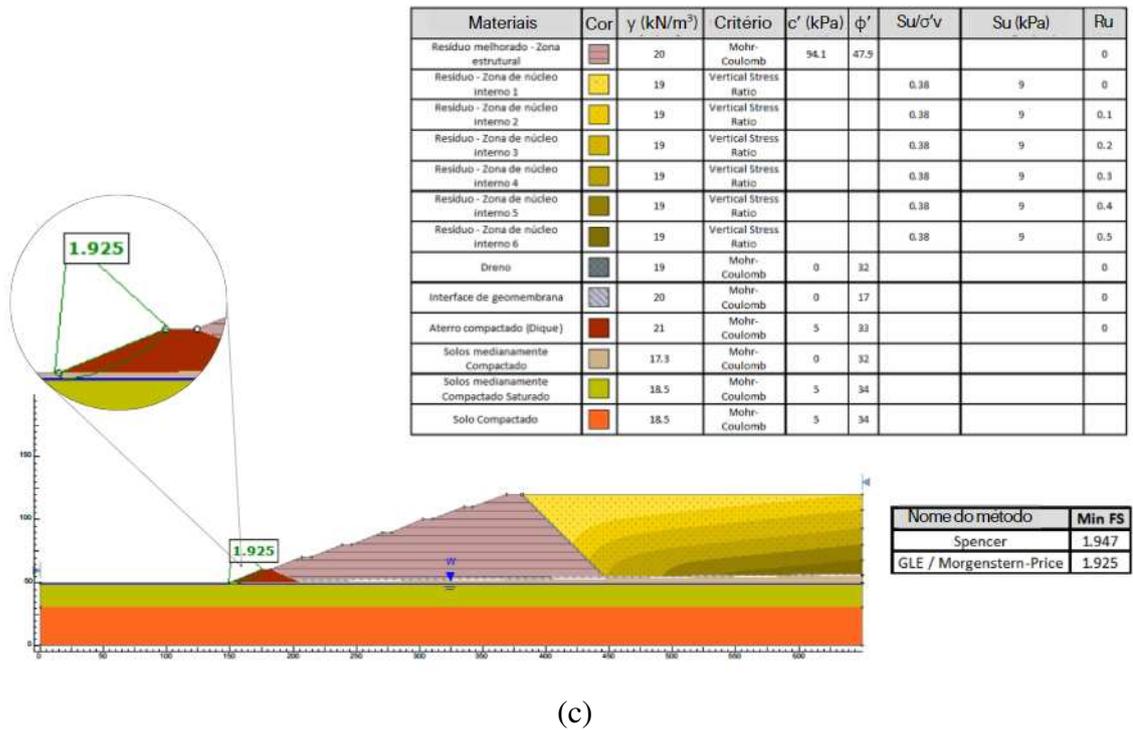
Fonte: Autor (2024)



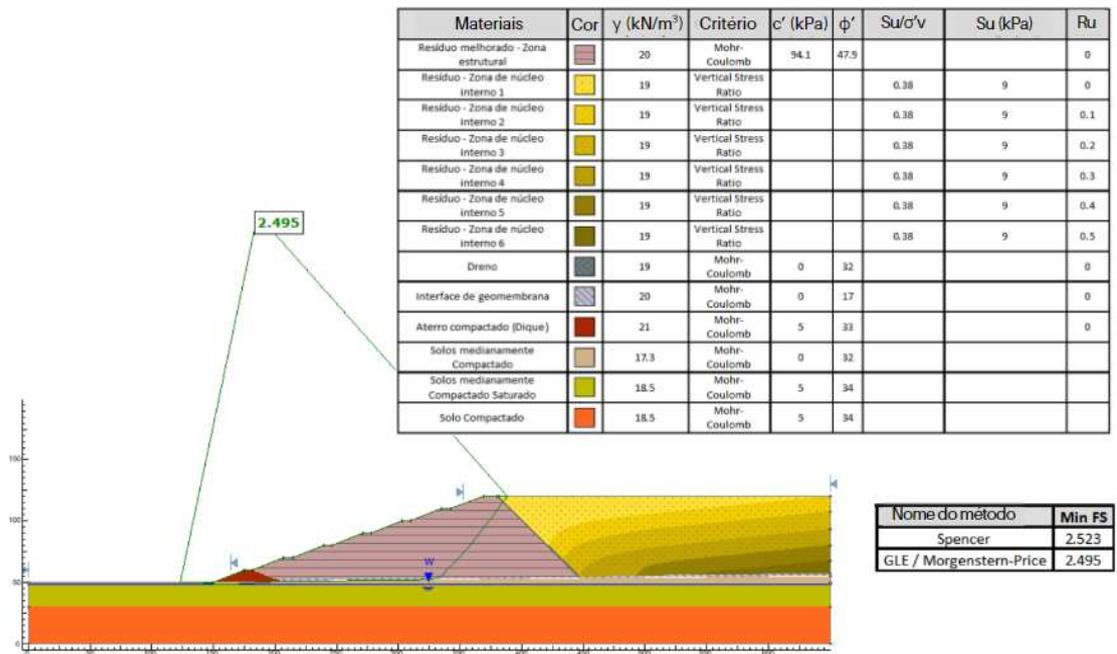
(a)



(b)



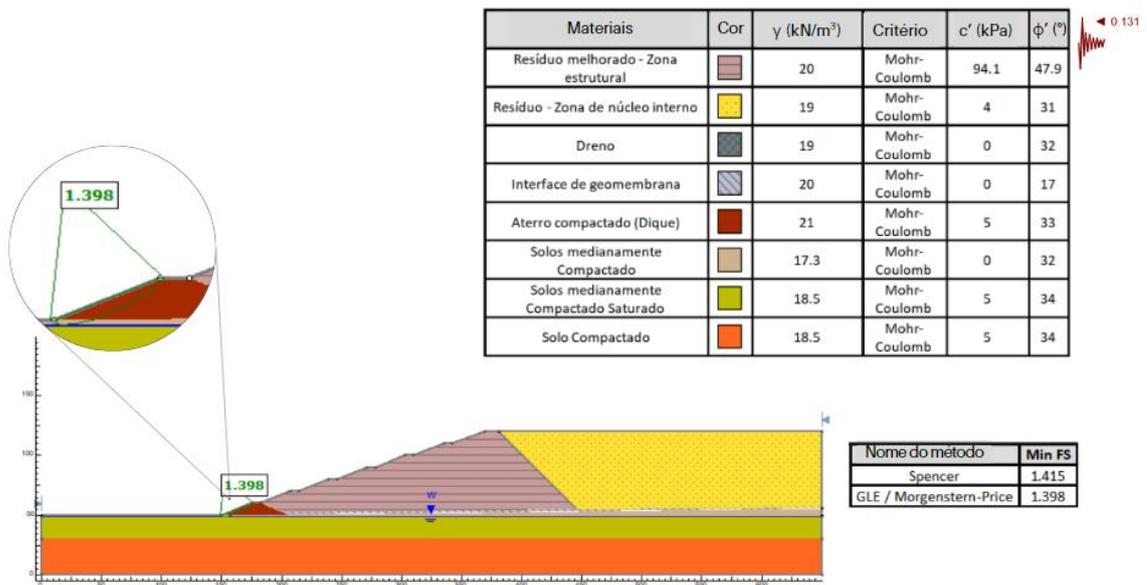
(c)



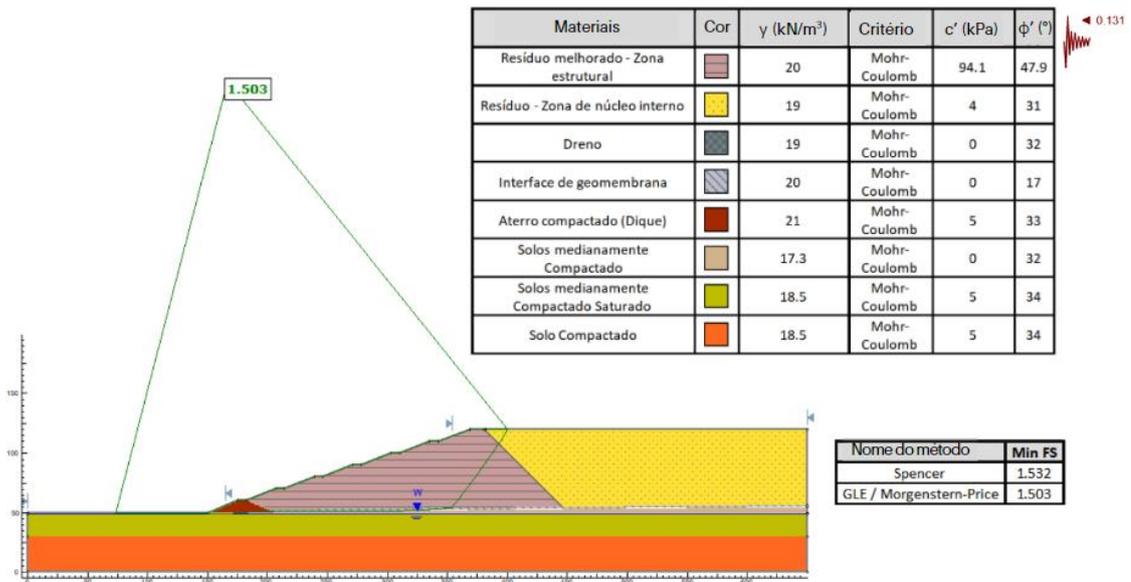
(d)

Figura C. 3: Cenário PC2 – Final de Constru o: (a) ruptura localizada sem  $R_u$ ; (b) ruptura global sem  $R_u$ ; (c) ruptura localizada com  $R_u$ ; (d) ruptura global com  $R_u$ .

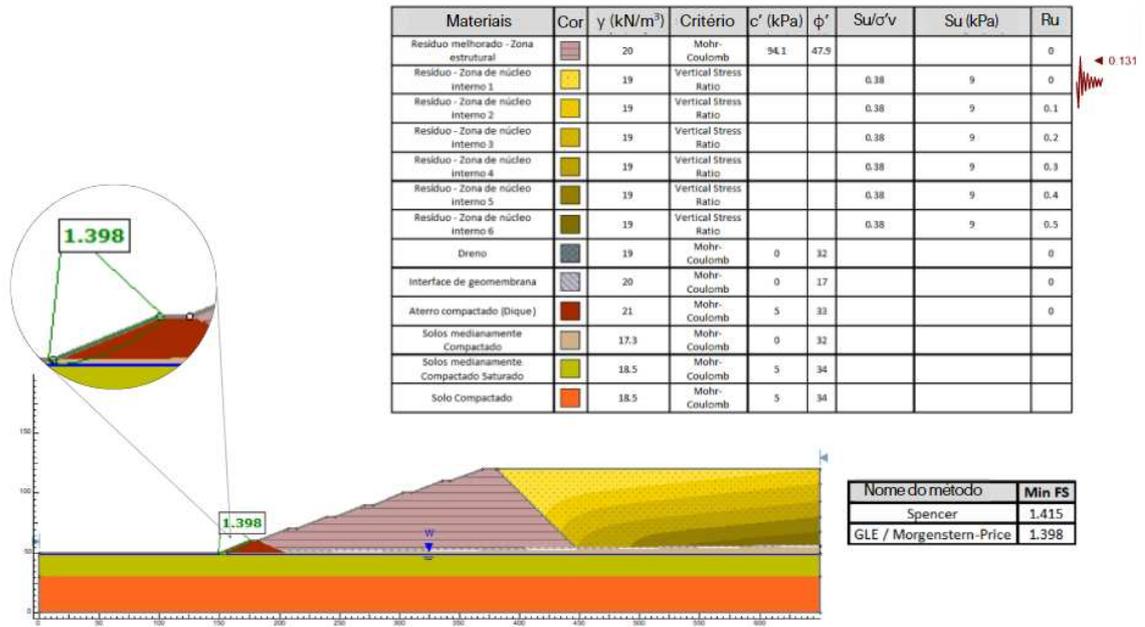
Fonte: Autor (2024)



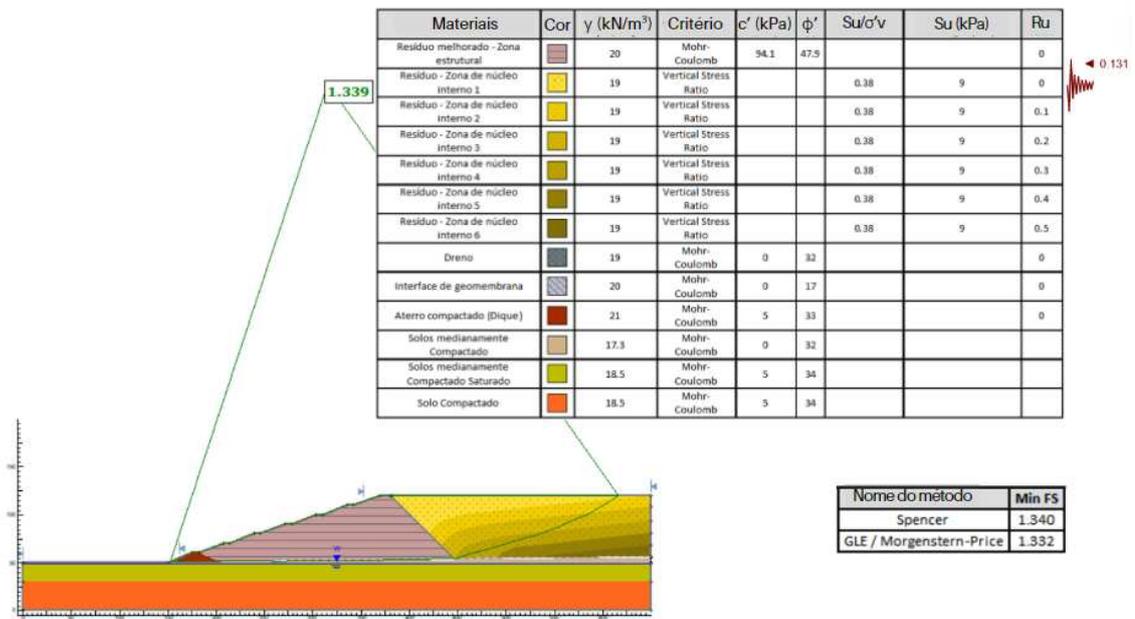
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura C. 4.: Cenário PC2 – Solicitação Sísmica (0,131g): (a) ruptura localizada sem Ru; (b) ruptura global sem Ru; (c) ruptura localizada com Ru; (d) ruptura global com Ru.

Fonte: Autor (2024)