

GÉSSICA SOARES PEREIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA E DA
CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL NO COMPORTAMENTO
HIDROMECÂNICO DE UMA ARGILA TROPICAL COM O USO
DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA**

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

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga

Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz
Roger Augusto Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

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

T

P436e
2024
Pereira, Gêssica Soares, 1991-
Estudo da influência da estrutura e da cimentação artificial no
comportamento hidromecânico de uma argila tropical com o uso da técnica
ultrassônica / Gêssica Soares Pereira. - Viçosa, MG, 2024.
249 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de
Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.267>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Estrutura do solo. 2. Solo - Cimento. 3. Solos - Testes. 4. Física do
solo. 5. Química do solo. I. Pitanga, Heraldo Nunes, 1973-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624.15

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB-6/2875


GÉSSICA SOARES PEREIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA E DA
CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL NO COMPORTAMENTO
HIDROMECÂNICO DE UMA ARGILA TROPICAL COM O USO
DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA**


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

APROVADA: 23 de fevereiro de 2024

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 GESSICA SOARES PEREIRA
Data: 12/07/2024 19:43:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Géssica Soares Pereira
Autora

Documento assinado digitalmente
 HERALDO NUNES PITANGA
Data: 12/07/2024 19:55:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Heraldo Nunes Pitanga
Orientador

*Dedico este trabalho
à Deus
aos meus pais, Geraldo e Geralda
ao meu esposo, Ramon
e à minha irmã, Fernanda.*

AGRADECIMENTOS

Gratidão acima de tudo ao meu amado Deus, pois tenho total certeza de que é Ele quem controla todos os aspectos da minha vida. Agradeço por ter me proporcionado a oportunidade de fazer este doutorado e por ter me capacitado e dado forças para chegar até o final de mais essa etapa de minha vida.

Ao meu esposo Ramon, meu grande amor, por ter estado comigo em todos os momentos dessa jornada. Agradeço pelo apoio na execução dos ensaios, diversas noites, feriados e finais de semana, sempre com muita paciência. Agradeço também pelo apoio emocional e o incentivo para seguir em frente, que foram fundamentais.

Aos meus pais Geraldo e Geralda, minha base e meu refúgio, pelas mais diversas formas de auxílio e por terem me conduzido ao que sou hoje; à minha irmã e melhor amiga Fernanda, por ser minha companheira e conselheira de todas as horas. À minha amada família o meu muito obrigada pelo incentivo, sem vocês eu não teria conseguido.

Ao Professor Dr. Heraldo Nunes Pitanga, por todos os anos de orientação e pela parceria, sempre me auxiliando e incentivando a fazer o melhor. Agradeço também pelas inúmeras contribuições neste trabalho.

Ao Professor Dr. Roberto Lopes Ferraz, pelo seu apoio fundamental no laboratório, na execução dos ensaios e compreensão dos resultados, sendo sempre solícito.

Ao Professor Dr. Roger Augusto Rodrigues, pelas valiosas sugestões dadas no transcorrer da pesquisa.

Aos Professores Paulo Sérgio, Cláudio, Klaus, Leonardo e Eduardo, pelo suporte na execução dos ensaios.

A todo pessoal do Laboratório de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Wellington, Natália, Marcelo, Leonício e Anderson, pela amizade, solicitude na execução dos ensaios, pelas conversas e brincadeiras que tornaram esse processo muito mais agradável.

Às queridas amigas que fiz na UFV, Ana Clara e Beatryz, obrigada pelo suporte nos momentos difíceis e pelas risadas que deixaram tudo mais leve.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, e também aos externos, por todo o conhecimento transmitido e disposição em ensinar.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela possibilidade de alcançar mais um grau acadêmico e pelo ensino de excelência desde a graduação.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

*“No coração, o homem planeja o seu caminho,
mas o Senhor determina os seus passos.”*
(Provérbios 16:9)

RESUMO

PEREIRA, G ssica Soares, D.Sc., Universidade Federal de Viosa, fevereiro de 2024. **Estudo da influência da estrutura e da cimentac o artificial no comportamento hidromecânico de uma argila tropical com o uso da técnica ultrassônica.** Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz e Roger Augusto Rodrigues.

Os solos tropicais, presentes em regiões de clima quente e úmido, como   o caso do Brasil, possuem inúmeras propriedades e peculiaridades de comportamento resultantes de seus processos geológicos e pedológicos. As características peculiares de estruturao desses solos dificultam seu entendimento geotécnico, incluindo a compreensão de seu comportamento quanto ao colapso. Um fator que aumenta ainda mais a complexidade do comportamento hidromecânico desses solos é a presena de cimentac o artificial. Essa complexidade resulta na existência, ainda hoje, de contradioes na literatura técnico-científica quanto ao efeito da cimentac o artificial sobre parâmetros geotécnicos. Neste contexto, esta pesquisa objetivou o desenvolvimento de um estudo experimental para investigar a influência da estrutura e da cimentac o artificial no comportamento hidromecânico de um solo residual tropical argiloso, considerando-se análises das respostas obtidas em nível macroestrutural subsidiadas pela microestrutura e mineralogia e pela aplicao da técnica ultrassônica, visando contribuir para o avano científico na compreensão das causas das peculiaridades comportamentais desses solos e do efeito da variao do grau de cimentac o. Os ensaios ultrassônicos foram realizados para prover informaoes complementares sobre a taxa de alterao das propriedades hidromecânicas do solo atribuídas à cimentac o. O estudo foi dividido em três artigos: o primeiro teve como foco investigar a influência da estrutura na curva de reteno de água e no comportamento do solo tropical residual argiloso quanto à compressibilidade e susceptibilidade ao colapso, analisando-se os fatores que interv m na ocorrência do colapso e o efeito de ciclos de umedecimento e secagem; o segundo é referente ao estudo das misturas do solo tropical argiloso com diferentes teores de cimento, a fim de se compreender as mudanas nas propriedades físicas e mecânicas associadas às alteraoes mineralógicas e microestruturais causadas pela cimentac o artificial, aplicando-se a técnica ultrassônica e avaliando-se, de forma correlacionada, os resultados dos ensaios propostos; o terceiro envolve a parte do estudo referente à análise das alteraoes no comportamento hidromecânico do solo tropical argiloso devido à variao do grau de

cimentação artificial, tendo por base análises do efeito da cimentação a nível microestrutural, como subsídio para interpretação dos resultados, e avaliações mediante aplicação da técnica ultrassônica. De forma geral, o programa experimental envolveu a realização de ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica, microestrutural, investigação físico-química, ensaios de resistência à compressão não confinada, módulo de resiliência, triaxial adensado e não drenado, ultrassônicos e determinação da curva de retenção de água. Os resultados indicaram alterações nas respostas hidromecânicas devidas à variação da estrutura e do grau de cimentação, sendo essas alterações explicadas pelas mudanças observadas na microestrutura. Compressibilidade, suscetibilidade e potencial de colapso, capacidade de retenção de água, deformabilidade e resistência não drenada foram afetados diretamente pela variação da estrutura. As alterações microestruturais, ao fornecerem variação no caminho para a propagação da onda ultrassônica, alteraram os valores de sua velocidade, o que permitiu associar essas alterações com as diferenças observadas através dos ensaios destrutivos, que também foram associadas às alterações microestruturais. Boas correlações foram obtidas entre as velocidades da técnica ultrassônica e os parâmetros obtidos a partir dos ensaios destrutivos. As constatações da pesquisa reforçam a eficiência da aplicação da técnica ultrassônica para análise da variação da estrutura, o que sugere sua aplicabilidade para avaliação da qualidade de conservação de amostras indeformadas, e do efeito da cimentação artificial, considerando tempo de cura e variação da quantidade de cimento. Isso permite que as velocidades ultrassônicas sejam consideradas como parâmetros preliminares para identificação do efeito da cimentação artificial em projetos ligados à estabilização solo-cimento, sendo possível obter correlações com parâmetros mecânicos obtidos de ensaios destrutivos de módulo de resiliência, resistência à compressão não confinada e ensaio triaxial adensado não drenado.

Palavras-chave: estrutura do solo; cimentação artificial; comportamento hidromecânico; técnica ultrassônica.

ABSTRACT

PEREIRA, G ssica Soares, D.Sc., Federal University of Viosa, February, 2024. **Study of the influence of structure and artificial cementation on the hydromechanical behavior of a tropical clay using the ultrasonic technique.** Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Roberto Lopes Ferraz and Roger Augusto Rodrigues.

Tropical soils, found in regions with hot and humid climates such as Brazil, have numerous properties and behavioral peculiarities resulting from their geological and pedological processes. The peculiar structural characteristics of these soils make them difficult to understand geotechnically, including their collapse behavior. A factor that further increases the complexity of the hydromechanical behavior of these soils is the presence of artificial cementation. This complexity leads to the existence of contradictions in the technical-scientific literature regarding the effect of artificial cementation on geotechnical parameters. In this context, this research aimed to develop an experimental study to investigate the influence of fabric and artificial cementation on the hydromechanical behavior of a tropical clayey residual soil, considering analyses of the responses obtained at the macrostructural level. These analyses were supported by microstructure and mineralogy and by the application of ultrasonic technique, in order to contribute to the scientific progress in understanding the causes of the behavioral peculiarities of these soils and the effect of varying the degree of cementation. Ultrasonic tests were performed to provide complementary information on the rate of change of the hydromechanical properties of the soil due to cementation. The study has been divided into three separate papers: the first paper was focused on the study of the influence of the fabric on the soil water retention curve and on the behavior of tropical residual clay soil in terms of compressibility and its susceptibility to collapse. It was also analyzed the factors that intervene in the occurrence of the collapse and the effect of wetting and drying cycles on the clay soil behavior; the second paper is about the study of mixtures of tropical clay soils with different cement content. The main objective was to understand the changes in physical and mechanical properties associated with the mineralogical and microstructural alterations caused by artificial cementation. The ultrasonic technique was applied and the results of the proposed tests were evaluated in a correlated manner; the third part of the study involves the analysis of changes in the hydromechanical behavior of tropical clay soils due to variations in the degree of artificial cementation. The analyses

were based on the effect of cementation at the microstructural level as a basis for interpreting the results. Microstructural analyses were also applied for evaluations using the ultrasonic technique. Overall, the experimental program included geotechnical, chemical, mineralogical and microstructural characterization tests, physicochemical investigations, unconfined compressive strength tests, resilient modulus tests, triaxial tests (consolidated and undrained), ultrasonic tests, and determination of the soil water retention curve. The results showed changes in the hydromechanical responses due to variations in the structure and degree of cementation, which were explained by the changes observed in the microstructure. Compressibility, susceptibility and collapse potential, water retention capacity, deformability and undrained strength were directly affected by the variation in structure. The microstructural changes, by varying the path for the propagation of the ultrasonic wave, modified the velocity values. This made it possible to relate these changes to the differences observed in the destructive tests, which were also related to the microstructural changes. Good correlations were obtained between the ultrasonic velocities and the parameters obtained from the destructive tests. The research results confirm the efficiency of the ultrasonic technique for the analysis of structural variations, suggesting its applicability for the evaluation of the conservation quality of undeformed samples. It was also effective in analyzing the effect of artificial cementation, taking into account the curing time and the variation in the amount of cement. These results allow ultrasonic velocities to be considered as preliminary parameters for identifying the effect of artificial cementation in soil-cement stabilization projects. In this way, it is possible to obtain correlations with mechanical parameters obtained from destructive resilient modulus tests, unconfined compressive strength and undrained triaxial tests.

Key-words: fabric; artificial cementation; hydromechanical behavior; ultrasonic technique.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1: Difratoograma do solo adotado na pesquisa.....	46
Figura 2: Micrografias do solo pesquisado obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.	47
Figura 3: Curva de compactação Proctor Normal do solo argiloso investigado.....	47
Figura 4: Difratoograma do cimento CPV-ARI adotado na pesquisa.....	48
Figura 5: Preparo de amostras para reconstituição por compressão hidrostática: (a) moldagem da amostra no tubo de PVC; (b) tubo de PVC suspenso no suporte; (c) amostra no berço colocada dentro da câmara hidrostática.....	52
Figura 6: Corpos de prova reconstituídos por compressão hidrostática: (a) após retirada da câmara hidrostática; (b) talhagem de corpo de prova em anel para ensaio edométrico.....	53
Figura 7: Corte esquemático do molde de PVC.....	54
Figura 8: Secagem do corpo de prova para ensaio CRS	60
Figura 9: Etapas do processo de umedecimento e secagem: (a) saturação por capilaridade (b) secagem à temperatura controlada.....	61
Figura 10: Curvas granulométricas: solo natural e solo com 2% de cimento	63
Figura 11: Micrografias das estruturas obtidas com aproximação x2500: (a) LW_SN; (b) LW_SC; (c) OW_SN; (d) OW_SC; (e) HW_SN; (f) HW_SC.	66
Figura 12: Curvas de compressão dos corpos de prova	68
Figura 13: Curvas de compressão dos corpos de prova HW	71
Figura 14: Curvas de compressão dos corpos de prova LW	71
Figura 15: Curvas de compressão dos corpos de prova OW	72
Figura 16: Curvas de compressão de corpos de prova das estruturas LW com diferentes estágios de inundação: (a) solo natural (SN); (b) solo com cimento (SC).....	75
Figura 17: Micrografias das estruturas LW: (a) Solo natural x1000; (b) Solo com cimento x1000.....	76
Figura 18: Potencial de colapso de acordo com D 5333 (ASTM, 2003)	77
Figura 19: Variação da VPU para as três condições de moldagem	80
Figura 20: Micrografias das estruturas obtidas com aproximação x300: (a)HW_SC; (b) LW_SC; (c) OW_SC.	82
Figura 21: Resultados dos ensaios realizados para obtenção das curvas de retenção de água	83
Figura 22: Curvas de retenção de água obtidas pela aplicação dos modelos dual-BC, dual-VG, dual-KO: (a) LW_SN; (b) LW_SC; (c) OW_SN; (d) OW_SC; (e) HW_SN; (f) HW_SC.	88
Figura 23: Curvas de adensamento da estrutura obtida com umidade abaixo da ótima (LW).....	90

Figura 24: Curvas de adensamento da estrutura obtida na umidade ótima (OW)	90
Figura 25: Valores de VPU para os corpos de prova submetidos ao ensaio CRS.	92
Figura 26: Curvas de compressão estruturas LW_SN	96
Figura 27: Curvas de compressão estruturas LW_SC.....	97

CAPÍTULO 3

Figura 1: Difratoograma do solo argiloso tropical.....	121
Figura 2: Difratoograma do cimento.....	122
Figure 3: Curva de compactação Proctor Normal solo natural	123
Figura 4: Provetas graduadas utilizadas no ensaio do método físico-químico	126
Figure 5: Arranjo ilustrativo do posicionamento dos transdutores com um corpo de prova descoberto.	127
Figure 6: Prensa de ensaio triaxial cíclico utilizada para ensaios de MR	129
Figure 7: Difratoograma do solo natural e das misturas de solo com cimento	130
Figure 8: Imagens dos corpos de prova após a ação da fenolftaleína: (a) Solo natural; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento.....	130
Figura 9: Variação do pH com o teor de cimento	132
Figura 10: Micrografias das estruturas obtidas (x300): (a) Solo natural; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento.	133
Figura 11: Variação da ρ_s com o teor de cimento	134
Figura 12: Variação da granulometria com o teor de cimento.....	135
Figura 13: Variação dos limites de Atterberg e do IP com teor de cimento	136
Figura 14: Variação volumétrica <i>versus</i> teor de cimento adicionado ao solo.....	137
Figura 15: Variação da VPU com o teor de cimento e tempo de cura.....	139
Figura 16: Variação de VPU considerando as variáveis: (a) % partículas tamanho areia; (b) % partículas tamanho argila.	140
Figura 17: Variação da VPU considerando a variação volumétrica decorrente das mudanças físico-químicas	141
Figura 18: MR nas condições de solo natural e de misturas de solo com cimento.....	144
Figura 19: RCS nas condições de solo natural e de misturas de solo com cimento	144
Figura 20: Correlações entre diferentes propriedades mecânicas das misturas solo e cimento: (a) VPU e MR; (b) VPU e RCS.	147
Figura 21: Correlações entre teor de cimento e diferentes propriedades mecânicas: (a) RCS; (b) MR; (c) VPU.....	148
Figura 22: Percentual de incremento devido variações no teor de cimento e no tempo de cura.....	149

CAPÍTULO 4

Figura 1: Difratoograma do solo adotado na pesquisa.....	168
Figura 2: Difratoograma do cimento CPV-ARI adotado na pesquisa.....	169
Figura 3: Imagens dos corpos de prova após a ação da fenolftaleína: (a) Solo natural; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento.....	178
Figura 4: Variação de pH com o teor de cimento nas misturas de solo com cimento ...	179
Figura 5: Micrografias das estruturas obtidas: (a) Solo natural x300; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento	180
Figura 6: Variação de ρ_s com o teor de cimento nas misturas de solo com cimento....	181
Figura 7: Variação da granulometria em função do teor de cimento nas misturas de solo com cimento.....	182
Figura 8: Variação de LL, LP e IP em função do teor de cimento nas misturas de solo com cimento.....	183
Figura 9: Velocidade da onda longitudinal (VPU) para condições solo natural (SN) e com distintos teores de cimento (SC)	184
Figura 10: Velocidade da onda transversal (VSU) para condições solo natural (SN) e com distintos teores de cimento (SC)	184
Figura 11: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico para ondas P (VPU) e ondas S (VSU) e o fator vazios/cimento (f_{vc}).....	185
Figura 12: Resultados ensaios para determinação das curvas de retenção de água (SN e SC)	189
Figura 13: Associação entre valores de ψ_1 (kPa) e teor de cimento (%).....	192
Figura 14: Curvas de retenção de água obtidas pela aplicação dos modelos de van Genuchten (VG) e Fredlund e Xing (FX): (a) SN; (b) SC 1%; (c) SC 2%; (d) SC 3%; (e) SC 5%; (f) SC 7%.....	195
Figura 15: Correlação entre sucção e VPU para um mesmo teor de umidade de referência	198
Figura 16: Deformação volumétrica na etapa de adensamento <i>versus</i> teor de cimento	199
Figura 17: Deformação volumétrica na etapa de adensamento <i>versus</i> VSU	201
Figura 18: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SN: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$	202
Figura 19: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SC 1%: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$	203
Figura 20: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SC 2%: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$	203
Figura 21: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SC 3%: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$	203

Figura 22: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SC 5%: (a) $\sigma_d \times \varepsilon_a$; (b) $\Delta u \times \varepsilon_a$	204
Figura 23: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU dos corpos de prova SC 7%: (a) $\sigma_d \times \varepsilon_a$; (b) $\Delta u \times \varepsilon_a$	204
Figura 24: ε_a (%) associada com $\sigma_{dm\acute{a}x}$ <i>versus</i> VSU	206
Figura 25: M3dulo de deformabilidade secante (E_{50}) <i>versus</i> o quadrado da VSU	209
Figura 26: Envolt3rias Mohr-Coulomb de tens3es totais: crit3rio $\sigma_{dm\acute{a}x}$	212
Figura 27: Envolt3rias Mohr-Coulomb tens3es efetivas: crit3rio $\sigma_{dm\acute{a}x}$	212
Figura 28: 3ngulo de atrito de pico <i>versus</i> teor de cimento	215
Figura 29: Intercepto coesivo <i>versus</i> teor de cimento.....	216
Figura 30: Intercepto coesivo <i>versus</i> o quadro da VSU.....	217
Figura 31: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SN	219
Figura 32: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SC 1%	219
Figura 33: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SC 2%	219
Figura 34: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SC 3%	220
Figura 35: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SC 5%	220
Figura 36: Trajet3ria de tens3es total e efetiva no plano q x p,p': amostras SC 7%	220
Figura 37: Correla33o entre VSU^2 e o par3metro de estado M.....	222
Figura 38: Correla33o entre VSU^2 e o par3metro de estado λ	222
Figura 39: Rela33o e- $\ln p'$ do solo natural e do solo com cimentaa33o no estado cr3tico	224
Figura 40: Rela33o $S_u \times \sigma'_a$ para solo natural e com distintos teores de cimento	226
Figura 41: Correla33o $\sigma_{dm\acute{a}x} / \sigma'_a$ e o quadrado de VSU.....	228
Figura 42: Correla33o S_u / σ'_a e o quadrado de VSU	228

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1: Caracterização química do solo por FRX e perda ao fogo.....	46
Tabela 2: Caracterização física do cimento CPV-ARI.	47
Tabela 3: Ensaio de caracterização geotécnica.....	55
Tabela 4: Modelos de ajuste da curva de retenção de água	59
Tabela 5: Caracterização geotécnica do solo natural e solo com 2% de cimento.....	64
Tabela 6: Condições iniciais dos corpos de prova submetidos ao ensaio edométrico incremental.....	68
Tabela 7: Variação do índice de vazios devido à inundação (Δe_c) e o potencial de colapso (PC) em diferentes níveis de tensão	72
Tabela 8: Valores de entrada de ar das diferentes estruturas avaliadas	85
Tabela 9: Valores dos R^2 e AIC obtidos para cada modelo aplicado através do <i>SWRC Fit</i>	86
Tabela 10: Parâmetros dos modelos com melhores correlações com os dados experimentais	87
Tabela 11: Percentual de variação da massa de água e de VPU	93

CAPÍTULO 3

Tabela 1: Caracterização química do solo (%).	120
Tabela 2: Caracterização física do cimento CPV-ARI.	122
Tabela 3: Ensaio de caracterização geotécnica.....	125

CAPÍTULO 4

Tabela 1: Caracterização química do solo por FRX e perda ao fogo.....	167
Tabela 2: Caracterização física do cimento CPV-ARI.	168
Tabela 3: Ensaio de caracterização geotécnica.....	172
Tabela 4: Modelos de ajuste da curva de retenção de água	174
Tabela 5: Valores de entrada de ar (ψ_1) das diferentes condições avaliadas	192
Tabela 6: Parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados experimentais no <i>SWRC Fit</i>	194
Tabela 7: Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e com cimento ..	211
Tabela 8: Parâmetros de resistência de pico para diferentes condições de tensão de adensamento.....	215
Tabela 9: Parâmetros de estado crítico obtidos pelos planos e $x \ln p'$ e $q \times p, p'$	221

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xv

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL.....	18
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
2. JUSTIFICATIVA.....	25
3. OBJETIVOS.....	26
4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DA TESE.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM SOLO TROPICAL RESIDUAL NO SEU COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO.....	36
1 INTRODUÇÃO	37
2 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4 CONCLUSÕES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ULTRASSÔNICA DOS EFEITOS DA CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL EM SOLOS TROPICAIS ARGILOSOS	115
1 INTRODUÇÃO	116
2 MATERIAIS E MÉTODOS	119
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	129
4 CONCLUSÕES	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DA CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL NA ESTRUTURA E NO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE UMA ARGILA TROPICAL.....	160
1 INTRODUÇÃO	116
2 MATERIAIS E MÉTODOS	166
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	177
4 CONCLUSÕES	229
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS.....	247
-------------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conhecimento do comportamento de solos tropicais residuais em regiões de clima tropical úmido, onde ocorrem condições climáticas favoráveis à sua vasta ocorrência, como é o caso do Brasil, apresenta uma elevada importância considerando que, na maioria dos casos, as camadas desses solos apresentam espessuras consideráveis, constituindo um fator de grande relevância na estabilidade de taludes e outras obras de engenharia geotécnica (Reis, 2004). Para a análise adequada desses solos, são necessários estudos investigativos de suas propriedades, considerando-se que, devido ao seu processo de formação, os solos residuais de clima tropical apresentam tipicamente anisotropia e variação vertical de propriedades (Heidemann *et al.*, 2018).

O processo de formação dos solos tropicais ocorre em três fases principais. Gomes, Guimarães e Marques (2018) definem a fase de decomposição como a fase inicial da formação desses solos, na qual ocorre ruptura físico-química dos minerais primários e posterior desagregação dos elementos (SiO_2 , Fe_2O_3 , etc.) que são transformados em íons simples. Os autores definem a segunda fase, a laterização, como caracterizada pelo enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argilomineral predominante e quase exclusivo, o que confere a estes solos uma coloração típica, sendo necessárias condições favoráveis de drenagem para possibilitar a associação adequada desses elementos nesta fase. A desidratação é definida pelos autores como a terceira fase do processo, a qual ocorre sobre os materiais enriquecidos com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, originando minerais cristalinos densos (limonita, goethita, hematita).

Os solos tropicais apresentam peculiaridades em relação aos solos de origem temperada devidas às condições climáticas nas quais são originados. Gomes, Guimarães e Marques (2018) afirmam que tais solos possuem inúmeras propriedades e peculiaridades de comportamento resultantes de processos geológicos e pedológicos. Segundo Queiroz (2015), a estrutura e a composição químico-mineralógica diferenciadas que estes solos apresentam interferem diretamente nos seus comportamentos mecânico e hidráulico, tanto das feições naturais quanto das compactadas. Borges (2014) afirma que as características peculiares de estruturação dos solos tropicais dificultam o seu entendimento geotécnico.

Lopera (2016) afirma que cada fenômeno natural ou externo ao solo pode alterar a sua composição, sua estrutura e, conseqüentemente, seu desempenho de engenharia. O autor ainda afirma que existe uma série de diferentes processos, uma interação ou ação, seja natural ou artificial, com origem própria no material, ou externa, que alteram suas propriedades e o seu comportamento, o que causa interferências na resposta do solo às ações de origem mecânica ou hidráulica. A análise dessas respostas permite a compreensão de como é possível aproveitar cada fator para melhorar os resultados e o desempenho desse material.

Em função da frequente agregação das partículas, é desenvolvido, nesses solos, um comportamento em dois estágios definidos pela macro e microestrutura, o chamado comportamento bimodal, que consiste basicamente em solos que apresentam duas classes de poros contrastantes. Para essa análise, a curva característica de retenção de água é bastante eficaz para representar este comportamento típico (Feuerharmel; Gehling; Bica, 2006).

A curva característica de retenção de água constitui uma ferramenta através da qual os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos não saturados podem ser entendidos, a partir de uma análise das variações no teor de água em relação à sucção do solo (Fredlund; Rahardjo, 1993; Rahardjo *et al.*, 2019). Pode-se destacar que esta é empregada para se estimar vários parâmetros descritos no comportamento dos solos não saturados, como, por exemplo, a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e o comportamento quanto à variação volumétrica (Fredlund; Rahardjo, 1993; Vanapalli *et al.*, 1996; Leong; Rahardjo, 1997; Barbour, 1998; Toll; Ong, 2003; Sheng; Fredlund; Gens, 2008; Goh; Rahardjo; Choon, 2010; Sheng; Zhou; Fredlund, 2011; Schnellmann; Rahardjo; Schneider, 2015; Zhai *et al.*, 2019a, Cai *et al.*, 2020).

Satyanaga *et al.* (2013) afirmam que a curva característica de retenção de água é uma propriedade relevante e fundamental para entender os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos não saturados. Segundo Araújo *et al.* (2017), a curva característica de retenção de água constitui uma importante propriedade do solo que permite análises hidráulicas, granulométricas e de demais propriedades relacionadas ao arranjo estrutural do solo.

No que se refere aos fatores que influenciam na determinação da curva característica de retenção de água, Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999) citam as características do solo, tais como histórico de tensões e estrutura, além de agregações/cimentação, índice de vazios, tipo de solo, mineralogia, textura, teor de umidade inicial (trajetória de umedecimento ou secagem). Solos com distintas distribuições granulométricas e texturas possuem diferentes curvas características de retenção de água (Gallage; Uchimura, 2010; Rahardjo *et al.*, 2012). Zhai *et al.* (2019b) afirmam que todos os poros dos solos apresentam formato irregular e tamanhos

distintos, e, segundo Hu *et al.* (2013), a distribuição do tamanho dos poros apresenta um papel decisivo no comportamento dos solos quanto à retenção de água.

Dessa forma, uma análise da estrutura do solo mediante avaliação dos macroporos e microporos (macroestrutura e microestrutura) contribui para uma compreensão mais aprofundada e abrangente sobre o comportamento dos solos quanto à retenção de água e para além dela.

A estrutura dos solos, incluindo-se o arranjo dos grãos no arcabouço sólido e as ligações entre as partículas, é reconhecida como a propriedade física mais importante dos solos naturais (Jiang *et al.*, 2015). Especificamente em relação aos solos residuais, Collins (1985) define a sua estrutura como um esqueleto poroso de minerais parentais e agregados de partículas com cimentação variável (macroestrutura), herdada da rocha mãe ou neoformada, preenchido parcialmente por um plasma poroso formado pelos minerais secundários com estrutura própria (microestrutura).

Segundo Rabot *et al.* (2018), a estrutura do solo é reconhecida por controlar muitos processos, como a retenção de água, a infiltração, as trocas gasosas, a dinâmica dos nutrientes em solos orgânicos, a forma como ocorre a penetração de raiz e a suscetibilidade à erosão. Além disso, um aspecto que está intrinsecamente relacionado com a estrutura do solo é seu comportamento colapsível (Vilar; Rodrigues; Nogueira, 1981; Moncada, 2004; Gutierrez, 2005; Silveira; Reis, 2021).

Ao serem considerados os efeitos da estrutura, muitos questionamentos surgem naturalmente. Por exemplo, como a estrutura influencia nos comportamentos do solo quanto à compressão e à resistência, e qual é o mecanismo fundamental do comportamento dos solos que é afetado pela estrutura (Jiang *et al.*, 2015).

As contribuições da estrutura do solo nos mecanismos que regem o seu comportamento têm sido amplamente pesquisadas através de amostras indeformadas de solo natural (Burland, 1990; Leroueil; Vaughan, 1990) ou amostras de solo com cimentação artificial (Coop; Atkinson, 1993; Ismail; Joer; Randolph, 2002; Rotta *et al.*, 2003; Consoli *et al.*, 2007; Wang; Leung, 2008a, 2008b; Rabbi *et al.*, 2011; Taheri *et al.*, 2012; Taheri; Tatsuoka, 2012; Yasuhara *et al.*, 2012), e muitos dos resultados encontrados têm se mostrado úteis para o entendimento das propriedades dos solos em foco.

Entretanto, autores como Jiang *et al.* (2015) afirmam que, apesar dos estudos e das muitas técnicas avançadas empregadas, a associação direta da estrutura dos solos com seu comportamento ainda não é bem compreendida, devido à dificuldade de se determinar com precisão o efeito da estrutura em ensaios geotécnicos de laboratório. Os autores ainda citam a

degradação da estrutura como uma consideração importante para se interpretar adequadamente o comportamento dos solos pós plastificação. Neste sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas cujo foco é a estrutura do solo e como sua variação afeta parâmetros dos seus comportamentos hidráulico e mecânico.

Diversos autores apontam que o teor de umidade, o esforço de reconstituição e a técnica de preparo de amostras por reconstituição são fatores determinantes dos comportamentos mecânico e hidráulico dos solos (Asmani; Hafez; Nurbaya, 2011; Romero, 2013; Cetin; Cetin; Aydilek, 2014; Li; Vanapalli; Li, 2016; Santos; Esquivel, 2018). A influência desses fatores sobre o comportamento geotécnico dos solos é, geralmente, atribuída às diferentes estruturas produzidas quando os procedimentos de preparo das amostras são alterados (Watabe; Leroueil; Le Bihan, 2000; Romero; Vecchia; Jommi, 2011; Romero, 2013; Zhang *et al.*, 2018).

Ao se investigar a influência da estrutura considerando-se solos tropicais residuais como objeto de estudo, dois aspectos devem ser ressaltados. O primeiro corresponde ao microestrutural, o qual, segundo Dias Neto (2020), é fundamental para uma correta avaliação do comportamento geotécnico desses materiais. Tal aspecto, associado ao processo particular de formação que resulta em uma composição químico-mineralógica específica, favorece a formação de agregações de partículas de solo.

Segundo Neto *et al.* (2018), são essas agregações de partículas de solo que produzem uma estrutura com distribuição bimodal de poros no estado natural. Essa distribuição de poros característica, de acordo com Boszczowski (2008), é fornecida pela existência de uma estrutura fracamente cimentada nos solos residuais. Para análise da estrutura bimodal dos solos residuais, Otalvaro *et al.* (2016) citam ferramentas, como as curvas de distribuição do tamanho dos poros e as curvas características de retenção de água, que permitem que essas peculiaridades sejam facilmente observadas. Outra técnica recomendada para essas análises é a microscopia eletrônica de varredura (Carvalho *et al.*, 2015).

O segundo aspecto que merece destaque é a cimentação, seja ela natural ou artificial. Segundo Rinaldi e Capdevila (2006), a sucção matricial e a cimentação juntas apresentam uma influência significativa no comportamento tensão-deformação de solos levemente cimentados. Esses autores destacam que o efeito combinado de ambas durante a formação do solo pode estabilizar a sua estrutura em um elevado índice de vazios.

No que se refere ao papel da cimentação nos solos, Alonso e Gens (1993), ao compararem o comportamento das curvas de compressão de amostras de um mesmo solo não saturado nas condições naturais de campo, com cimentação, com as de amostras reconstituídas, observaram que, para uma dada tensão de confinamento, o material cimentado mantém um

índice de vazios maior que o dos solos reconstituídos. Com o aumento da tensão de confinamento em níveis superiores ao da tensão de escoamento plástico do solo cimentado, os solos cimentado e não cimentado tendem a apresentar comportamentos similares, indicando ocorrência de uma quebra progressiva das ligações de cimentação entre as partículas.

Em relação à cimentação artificial de solos não saturados, sua principal aplicabilidade está em fornecer uma estruturação para os solos. Segundo Fontoura (2015), a estrutura proporciona ao solo, ao ser comparado ao mesmo material no estado reconstituído (desestruturado), resistência e rigidez notadamente superiores e altera a relação entre as tensões efetivas médias e o volume de vazios, permitindo um equilíbrio para estados volumétricos impossíveis de serem sustentados sem a presença da estrutura.

Neste sentido, o uso da cimentação artificial amplia as possibilidades de análises de distintas estruturas dos solos, podendo promover-se uma estruturação no solo através da variação das condições de ligação entre as partículas.

Segundo Prietto (2004), em análises das características peculiares dos solos cimentados, são de fundamental importância os estudos que contemplem o comportamento elástico de materiais geotécnicos, o fenômeno da plastificação associado à quebra de cimentações, o comportamento pós-pico e os aspectos relativos à microestrutura destes materiais. O autor, em sua pesquisa sobre a resistência e a dilatância de solos cimentados, chegou à conclusão que, embora um considerável esforço nesta direção venha sendo realizado pela comunidade científica, pesquisas adicionais são claramente necessárias para a compreensão de todos os fenômenos físicos envolvidos.

Consoli *et al.* (2007), em uma pesquisa destinada a avaliar a influência da quantidade de cimento, da porosidade e do teor de umidade em um solo arenoso não saturado e com cimentação artificial, observaram que a resistência à compressão não confinada aumentou linearmente com o aumento do teor de cimento e exponencialmente com a redução na porosidade da mistura compactada. Além disso, os autores afirmam que uma razão entre a porosidade da mistura e o conteúdo volumétrico de cimento demonstrou ser um parâmetro mais adequado para se avaliar a resistência à compressão não confinada da mistura solo-cimento estudada do que a relação água/cimento.

Lawton, Fragasz e Hetherington (1992), ao avaliar o comportamento colapsível de alguns solos, enumeraram os principais fatores responsáveis por tal comportamento, tendo nesta listagem fatores relacionados à presença de cimentação no solo. Segundo os autores, a presença de agentes de ligações intergranulares ou cimentantes que tornam o solo estabilizado em condições não saturadas, a ruptura por cisalhamento das ligações intergranulares (forças

capilares, pontes de argila, agentes cimentantes químicos, como óxido de ferro e carbonato de cálcio) e a redução de ligações cimentantes pelo efeito da água estão entre os principais responsáveis pela ocorrência do colapso.

Em seus estudos, Khelifa *et al.* (2018) encontraram resultados que indicaram a possibilidade de redução do potencial de colapso de um solo colapsível, a um nível aceitável, através da adição de baixos teores de cimento em corpos de prova com distintos teores de umidade inicial sob o efeito de variadas energias de compactação. Entretanto, mais pesquisas são necessárias para que seja possível afirmar que a adição de cimento promove uma redução no potencial de colapso de um solo. Assim, faz-se relevante a busca pela compreensão de como a cimentação, seja ela natural do solo ou artificial, interfere em diferentes estruturas do solo, possibilitando uma análise mais abrangente do efeito da cimentação na colapsibilidade do solo.

Outro efeito da cimentação artificial do solo que constitui ainda uma incógnita é a sua influência no ângulo de atrito. Silva (2016) afirma que, na literatura, não existe um consenso sobre o comportamento do ângulo de atrito em função da variação do teor de cimento. De acordo com Severo (2011), alguns pesquisadores relatam que o agente cimentante tem efeito negligenciável sobre o ângulo de atrito de pico e outros relatam que o agente cimentante conduz a um aumento deste parâmetro.

Em um cenário científico no qual encontram-se pesquisas que não constataram alteração no ângulo de atrito devido à cimentação artificial (Clough *et al.*, 1981; Schnaid; Prietto; Consoli, 2001; Custódio, 2009; Lopes, 2012) e pesquisas que observaram um aumento no valor do ângulo de atrito devido à cimentação artificial (Lade; Overton, 1989; Rohlfs Júnior, 1996; Cruz, 2008; Oliveira, 2015; Silva, 2016), investigações complementares se fazem necessárias para que se evolua na compreensão das causas envolvidas em tais variações de resultados. Ao considerar-se ainda o fato de utilizar-se a cimentação artificial como mecanismo de estabilização química dos solos para fins rodoviários e de estabilidade de taludes, percebe-se como a compreensão abrangente do efeito da cimentação artificial nesse parâmetro de resistência do solo apresenta grande aplicabilidade prática para a engenharia geotécnica.

Em relação aos comportamentos hidráulico e mecânico dos diversos tipos de solos, é de consenso geral da comunidade científica a elevada variabilidade desses comportamentos devida às diferentes características e às particularidades de cada tipo de solo.

Os contrastes de resultados existentes na literatura técnico-científica, em alguns aspectos vinculados às particularidades de composições químicas, granulométricas, mineralógicas e às peculiaridades comportamentais dos diferentes solos, confirmam a necessidade de pesquisas que investiguem o comportamento de solos com e sem adição de

outros elementos, como o cimento, por exemplo. Sarro, Assis e Ferreira (2021) afirmam que, devido ao processo natural de formação dos solos, existem heterogeneidades significativas entre os seus variados tipos e nas condições nas quais são empregados, seja no estado natural ou compactado, tornando imprescindível o uso de tecnologias mais avançadas para a investigação de amostras deste material geológico com vistas ao seu emprego na engenharia civil.

Nessa linha, o uso de ensaios não destrutivos e que permitam uma replicabilidade dos resultados se faz pertinente. Uma alternativa é a técnica ultrassônica, que, de acordo com Sarro e Ferreira (2019), é vastamente utilizada para a caracterização de rochas e diversos materiais de construção, como madeiras, matrizes cimentícias e metais, e também tem se mostrado eficiente nos estudos investigativos envolvendo solos.

É de conhecimento da comunidade científica que os solos são materiais sujeitos à deformação e que a velocidade de propagação de onda está relacionada com a orientação das partículas, dos poros e de outros constituintes que compõem os solos (Soylemez, 2018). Muitas pesquisas mostram que existe uma relação direta entre os parâmetros relacionados à propagação de onda (comprimento, amplitude, frequência, intervalo de tempo e velocidade) e os parâmetros das rochas e solos (Gardner; Gardner; Gregory, 1974; Inoue; Ohomi, 1981; Gaviglio, 1989; Boadu, 2000; Kahraman, 2001, 2002; Fener *et al.*, 2005).

Selçuk e Seker (2019) afirmam que, teoricamente, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU), um parâmetro ligado à densidade e ao módulo elástico dos materiais e, portanto, fortemente afetado pela rigidez do material, consiste em um indicador eficiente das propriedades do solo para avaliar a sua capacidade de suporte.

Alguns autores estudaram a aplicação da técnica ultrassônica em corpos de prova de solo compactado e em obras geotécnicas. Tais estudos envolveram a análise da isotropia de solos compactados (Christ; Park, 2009) e a definição de fatores, tais como densidade do solo, teor de umidade, índice de vazios, estrutura do solo, energia e grau de compactação e os tipos de transdutores empregados, entre outros, que podem interferir na VPU (Ferreira *et al.*, 2014; Kolay; Baser, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Dongqing *et al.*, 2016; Chen; Wang; Yao, 2016; Sarro; Assis; Ferreira, 2021).

Nesse contexto, as pesquisas desenvolvidas que têm por base a técnica ultrassônica têm demonstrado uma aplicabilidade eficiente da mesma, o que demonstra que mais pesquisas com o seu uso e que busquem investigar outros aspectos ligados ao estudo dos solos, considerando-se aspectos de microestrutura e do comportamento hidromecânico, são pertinentes e necessárias.

2. JUSTIFICATIVA

Em países de clima tropical, como é o caso do Brasil, existe uma recorrência significativa de solos tropicais residuais, de modo que o desenvolvimento de pesquisas que buscam estudar os comportamentos mecânico e hidráulico desses solos, que apresentam peculiaridades comportamentais e cujo comportamento reológico ainda é bastante desconhecido, se faz justificável.

Nesta pesquisa, cujo estudo proposto envolve um solo tropical residual, visa-se contribuir com o avanço da Mecânica dos Solos aplicada aos solos tropicais. Considerando-se que a Mecânica dos Solos tradicional foi desenvolvida para solos sedimentares, constatações sobre os solos residuais tendem a agregar conhecimento a este campo do conhecimento científico.

No que se refere ao estudo da estrutura, o número de estudos a respeito da influência da estrutura do solo em relação ao seu comportamento hidromecânico ainda é limitado (Dalege; Lefebvre, 1984; Griffiths; Joshi, 1989; Borges, 2014), fator que também realça a relevância desse estudo que propõe a análise do comportamento hidromecânico de um solo residual, tendo-se como variável distintas estruturas produzidas com o objetivo de avaliar a interferência de cada uma delas no comportamento do solo quanto à retenção de água, compressibilidade, suscetibilidade ao colapso, resistência ao cisalhamento e rigidez.

Um segundo aspecto abordado no trabalho é a cimentação artificial. Considerando ainda a existência de resultados contraditórios na literatura técnico-científica e a necessidade de se aprofundar no conhecimento do efeito da cimentação em solos tropicais, justifica-se a relevância do presente trabalho na busca da compreensão do efeito da variável cimentação artificial no comportamento macro (hidromecânico) através da interpretação de alterações geradas na micromorfologia, aspectos químicos e mineralógicos e nos dados de caracterização geotécnica. Dessa forma, é possível avançar na compreensão e determinação de tendências comportamentais que permitam interpretar variações de resultados para diferentes solos devidas à presença de cimentação artificial. Além disso, a limitação do número de estudos envolvendo argilas tropicais e cimentação artificial com cimentos de elevada resistência inicial contribui para a relevância deste estudo.

Um outro ponto que justifica a importância desse estudo é o uso da técnica ultrassônica para análise da estrutura do solo e dos efeitos da cimentação artificial em um solo argiloso. Conforme já afirmado por Ortiz (2004), faz-se necessário aumentar o uso de técnicas não destrutivas na prática da engenharia geotécnica. Assim, justifica-se a proposta de se empregar

a técnica ultrassônica, que, diferentemente dos métodos tradicionais, não é uma técnica destrutiva e permite replicabilidade dos dados, para estudo da estrutura, observando-se fatores, como a influência de diferentes estruturas, posição dos poros e cimentação a partir de interferências na velocidade do pulso ultrassônico, buscando-se, além disso, avaliar de forma comparativa os aspectos de rigidez a partir da técnica ultrassônica e do ensaio convencional de módulo de resiliência.

Além disso, trata-se de uma técnica de baixo custo e fácil aplicação nas rotinas de ensaios geotécnicos. Por isso, mais estudos envolvendo suas diversas aplicabilidades para variados tipos de solos corroboram para que a técnica ultrassônica seja cada vez mais implementada em conjunto aos tradicionais ensaios geotécnicos destrutivos, a exemplo deste estudo, que aplica a técnica para fins de avaliação do efeito da cimentação artificial em argilas tropicais, tendo em vista a existência de poucos dados na literatura.

Apesar da proposta da pesquisa apresentar um caráter científico, um aspecto que contribui para a relevância de seu desenvolvimento é sua aplicabilidade prática (aspecto técnico), que está ligada ao fato de a maioria das obras de engenharia geotécnica serem construídas sobre solos residuais, além do fato de que a compreensão do comportamento mecânico dos solos contribui com diretrizes mais precisas para a elaboração de projetos e análises de estabilidade de taludes. Além disso, faz-se justificável o estudo referente ao colapso, no qual se busca investigar a influência da estrutura na susceptibilidade de um solo a este fenômeno causador de problemas graves na engenharia geotécnica.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa consiste no estudo experimental da influência da estrutura e da cimentação artificial no comportamento hidromecânico de um solo residual tropical, considerando-se análises das respostas obtidas em nível macroestrutural subsidiadas pela microestrutura e mineralogia e pela aplicação da técnica ultrassônica, visando contribuir para o avanço científico na compreensão das causas das peculiaridades comportamentais desse tipo de solo.

Para o alcance desse objetivo geral, os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Analisar como a estrutura e a cimentação artificial afetam a compressibilidade, a susceptibilidade de um solo residual ao colapso, a resistência ao cisalhamento e a

rigidez, com base no comportamento das amostras com estruturas produzidas com três condições distintas de moldagem;

- Avaliar a influência da estrutura e da cimentação artificial no comportamento hidráulico do solo, por meio da curva característica de retenção de água, observando-se as alterações promovidas no comportamento da curva;
- Analisar a interferência da variação da estrutura, da cimentação artificial e o efeito da evolução da cimentação artificial no solo na velocidade de propagação do pulso ultrassônico;
- Investigar o efeito da variação do percentual de cimentação artificial e de ciclos de molhagem e secagem na rigidez de estruturas, com e sem cimentação artificial, a partir de ensaios convencionais e da técnica ultrassônica.

4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO DA TESE

O texto do presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos conforme descrição apresentada nos itens a seguir:

- *Capítulo 1 – Introdução geral:* são apresentados uma introdução geral, a justificativa da relevância da pesquisa, os objetivos da pesquisa (geral e específicos) e a indicação da forma como o texto foi organizado;
- *Capítulo 2 – Análise do efeito da variação da estrutura de um solo tropical residual no seu comportamento hidromecânico:* este artigo refere-se ao estudo da influência da estrutura no comportamento hidromecânico do solo estudado, considerando-se a caracterização dos materiais, ensaios que avaliam compressibilidade, suscetibilidade ao colapso, determinação da curva característica de retenção de água, análises mineralógicas, análises microestruturais e emprego da técnica ultrassônica para análise do efeito de ciclos de molhagem e secagem nas diferentes estruturas investigadas, além da diferença do efeito da cimentação artificial para essas estruturas e sua evolução com o tempo de cura;
- *Capítulo 3 – Análise ultrassônica dos efeitos da cimentação artificial em solos tropicais argilosos:* este artigo apresenta o estudo dos efeitos da cimentação artificial em um solo argiloso tropical a partir da técnica ultrassônica, de forma integrada com as alterações observadas em outros ensaios. A velocidade de pulso ultrassônico foi avaliada para condições de solo natural e misturas de solo com cinco

diferentes teores de cimento, avaliando-se diferentes idades de cura. Os resultados de análises microestruturais, mineralógicas, caracterização geotécnica, ensaios para determinação de resistência (resistência à compressão não confinada) e rigidez (módulo de resiliência) e a investigação físico-química através da variação volumétrica foram discutidos a partir de correlações com os resultados da técnica ultrassônica, na busca por uma compreensão mais abrangente dos efeitos da cimentação;

- *Capítulo 4 – Influência da cimentação artificial na microestrutura e no comportamento hidromecânico de uma argila tropical compactada:* este artigo apresenta o estudo do efeito da variação do percentual de cimento sobre propriedades hidromecânicas de um solo tropical residual argiloso, considerando-se a determinação da curva de retenção de água, realização de ensaios triaxiais e de caracterização geotécnica para as condições de solo natural e para as misturas de solo com cinco distintos teores de cimento. Além disso, foram determinadas velocidades de propagação do pulso decorrente da aplicação da técnica ultrassônica, sendo essas avaliações subsidiadas por análises microestruturais, buscando-se correlacionar as propriedades hidromecânicas com as alterações observadas na caracterização geotécnica devido à presença do cimento;
- *Capítulo 5 – Conclusões gerais:* neste capítulo, é apresentado o compilado das conclusões gerais de toda a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, E. E.; GENS, A. **On the Mechanical Behavior of Arid Soils**, Engineering Characteristics of Arid Soils, Barcelona, p.177-206, 1993.

ARAÚJO, A.G.; SOUZA, J.C.; ALVES, E.C.; SILVA, I.L.A.; CORRECHEL, V. **Aplicação de modelos de ajustes de curvas características solo água em solos tropicais**. Revista Mirante, v. 10, n. 5, p.1-12, 2017.

ASMANI, D.M.Y.; HAFEZ, M.A.; NURBAYA, S. **Static laboratory compaction method**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 16, p. 1583-1593, 2011.

BARBOUR, S.L. **The soil water characteristic curve: a historical perspective**. Nineteenth Canadian geotechnical colloquium Canadian Geotechnical Journal, v. 35, p. 873-894, 1998.

BOADU, F.K. **Predicting the transport properties of fractured rocks from seismic information: numerical experiments.** J Appl Geophys, v. 44, p.103–113. 2000.

BORGES, C.R. **Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília-DF.** 2014. 222 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

BOSZCZOWSKI, R.B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.** 2008. 617 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2008.

BURLAND, J.B. **On the compressibility and shear strength of natural soils.** Geotechnique, v. 40, n. 3, p.329–378, 1990.

CAI, G.Q.; HE, X.Z.; DONG, L.; LIU, S.; XU, Z.; ZHAO, C.; SHENG, D. **The shear and tensile strength of unsaturated soils by a grain-scale investigation.** Granular Matter, v.22, n.1. 2020.

CARVALHO, J.; REZENDE, L.R.; CARDOSO, F.B.F; LUCENA, L.C.F.L; GUIMARÃES, R.C.; VALENCIA, Y.G. **Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations.** Transportation Geotechnics, v. 5, p. 3-19, 2015.

CETIN, Z.A.; CETIN, B.; AYDILEK, A.H. **Effect of compaction method on mechanical behaviour of graded aggregate base materials.** Road Materials and Pavement Design, v. 15, p. 220-235, 2014.

CHEN, J.; WANG, H.; YAO, Y. **Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction.** Ultrasonics, v.69, p.19-24. 2016.

CHRIST, M.; PARK, J.B. **Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils.** Cold Regions Science and Technology, v. 58, n. 3, p.136-142, 2009.

CLOUGH, W.G.; SITAR, N.; BACHUS, R.C.; RAD, N.S. **Cemented sands under static Loading.** Journal of Geotechnical Engineering Division, New York, v. 107, n.6, p. 799-817, 1981.

COLLINS, K. **Towards characterization of tropical soil microstructure.** Proc. 1st Conf. on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasilia, v.1, p.85-96, 1985.

CONSOLI, N.C; FOPPA, D. FESTUGATO, L.; HEINECK, K.S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils.** Journal Geotech. Geoenviron. Eng. v. 133, n.2, p.197-205. 2007.

COOP, M.; ATKINSON, J. **The mechanics of cemented carbonate sands.** Géotechnique, v.43, n.1, p.53-67, 1993.

CRUZ, R.C. **Influência da parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 216p, 2008.

CUSTÓDIO, G.S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados.** 2009. 187f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

DELAGE, P., LEFEBVRE, G. **Study of the structure of a sensitive champlain clay and of its evolution during consolidation.** Canadian Geotechnique Journal, v. 21, p. 21–35. 1984.

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

DONGQING, L.I.; XING, H.; FENG, M.; YU, Z. **The Impact of Unfrozen Water Content on Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soils.** Procedia Engineering, v. 143, p. 1210-1217. 2016.

FENER, M; KAHRAMAN, S; BAY, Y; GUNAYDIN, O. **Correlations between P-wave velocity and Atterberg limits of cohesive soils.** Can Geotech J, v. 42, n.2, p.673–677. 2005.

FERREIRA, G.C. DOS S.; SARRO, W. DE S.; HOFFMANN, M.; GONÇALVES, R. **Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo cimento por ultrassom.** Proc. Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ConaEnd2014, Abendi, São Paulo, SP, available in CD-ROM. 2014.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. **The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils.** Geotechnical Testing Journal, v. 29, n. 5, p. 419-425, 2006.

FONTOURA, T.B. **Comportamento tensão-deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de duna cimentada artificialmente.** Dissertação de Mestrado. 170f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2015.

FREDLUND, D G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley & Sons, 1993.

GALLAGE, C. P. K.; UCHIMURA, T. **Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils.** Soils and Foundations, v. 50, n. 1, p. 161–172, 2010.

GARDNER, G.H.F.; GARDNER, L.W.; GREGORY, A.R. **Formation velocity and density: the diagnostic basis for stratigraphy.** Geophysics. v.39, p.770–780, 1974.

GAVIGLIO, P, **Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density.** Rock Mech Rock Eng., v.22, p.299–306. 1989.

GOH, G.S.; RAHARDJO, H.; CHOON, L.E. **Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.136, n.4, p. 594-606. 2010.

GOMES, M.S.; GUIMARÃES, A.R.; MARQUES, M.E.S. **Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 9, n.5. 2018.

GRIFFITHS, F. J., JOSHI, R. C. **Changes in pore size distribution due to consolidation of clays.** Géotechnique, v.39, n.1, p. 159–167. 1989.

GUTIERREZ, N.H.M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná.** 2005. 325 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HEIDEMANN, M.; GOEDERT, A.N.; BELLAN, C.H.; GRAÇA, T.M.O; PACHECO, L.K. **Efeito da estrutura sobre o potencial erosivo de solos residuais de gnaiss do norte de Santa Catarina.** In XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, COBRAMSEC 2018, ABMS, Salvador, Bahia, Brasil, 2018.

HU, R.; CHEN, Y.F.; LIU, H.H; ZHOU C.B. **A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: Consideration of the change in pore-size distribution.** Geotechnique, v. 63, n. 16, p. 1389–1405, 2013.

INOUE, M.; OHOMI, M. **Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock.** In: Proceedings of the international symposium on weak rock, Tokyo, p. 9–13. 1981.

ISMAIL, M.A; JOER, H. A.; RANDOLF, M.F. **Cementation of porous materials using calcite.** Géotechnique, v.52, n.5, p.313-324, 2002.

JIANG, M.J.; LIU, J.; SUN, Y.; YIN, Z. **Investigation into macroscopic and microscopic behaviors of bonded sands using distinct element method.** Soils and Foundations, v. 53, n.6, p.804-819, 2015.

KAHRAMAN, S. **A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 38, p.729–733, 2001.

KAHRAMAN, S. **Estimating the direct P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.39, p.101–104. 2002.

KHELIFA, A.; AZEDDINE, L.; OUASSILA, B. **Treatment of collapsible soils by cement using the double consolidation method.** In: Hoyos L., McCartney J. (eds) Advances in Characterization and Analysis of Expansive Soils and Rocks. GeoMEast 2017. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. 2018.

KOLAY, E.; BASER, T. **Estimating of the dry unit weight of compacted soils using general linear model and multi-layer perceptron neural networks.** Applied Soft Computing, v. 18, p. 223–231, 2014.

LADE, P. V.; OVERTON, D. D. **Cementation Effects in Frictional Materials.** *Journal Of Geotechnical Engineering*, v. 115, n. 10, p.1373-1387, out. 1989. American Society of Civil Engineers (ASCE). 1989.

LAWTON, E.C.; FRAGASZY, R.J.; HETHERINGTON, M.D. **Review of wetting-induced collapse in compacted soil.** *Journal of Geotechnical Engineering Division. A.S.C.E*, v. 118, n. 9, p.1137-1394, 1992.

LEONG, E.C.; RAHARDJO H. **Permeability functions for unsaturated soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 123, p. 1118-1126, 1997.

LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P.R. **The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks.** *Geotechnique*. v. 40, n. 3, p.467–488, 1990.

LI, P.; VANAPALLI, S.K.; LI, T. **Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting.** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v.8, p. 256-274, 2016.

LOPERA, J.F.B. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.** 2016. 222 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

LOPES, F. M. G. **Estudo do comportamento mecânico de areias artificialmente cimentadas.** 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MONCADA, M.P.H. **Estudo em Laboratório de Características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico.** Dissertação de Mestrado. 218f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

NETO, M.P.; HERNÁNDEZ, O.; REINALDO, R.L.; BORGES, C.; CAICEDO, B. **Study of the relationship between the hydromechanical soil behaviour and microstructure of a structured soil.** *Earth Sciences Research Journal*, v. 22, n. 2, p. 91-101, 2018.

OLIVEIRA, A.D. **Comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados: ensaios, modelagem e aplicação.** 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ORTIZ, O.F.P. **Small and large monitoring of unsaturated soil behavior by means of multiaxial testing and shear wave propagation.** Doctoral Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, 2004.

OTALVARO, I.F.; CORDÃO NETO, M.P.; DELAGE, P.; CAICEDO, B. **Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil.** *Engineering Geology*, v. 205, p. 73-80, 2016.

PRIETTO, P.D.M. **Resistência e dilatância de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental.** 2004. 230 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

QUEIROZ, A.C.G. **Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados**. 2015. 127 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RABBI, A.T.MZ.; KUWANO, J.; DENG J.L.; BOON, T.W. **Effect of curing stress and period on the mechanical properties of cement-mixed sand**. *Soils and Foundations*, v. 51, n.4, p.651-661, 2011.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H.J. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review**. *Geoderma*. v. 314, p.122-137, 2018.

RAHARDJO, H. et al. **Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering**. In *International Journal of Geo-Engineering*, v.10, n. 1.2019.

RAHARDJO, H., SATYANAGA, A., LEONG, E.C., NG, Y.S. **Variability of residual soil properties**. *Eng. Geol.* p.141–142(124–140). 2012.

REIS, R.M. **Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaiss**. 2004. 222 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

RINALDI, V.; CAPDEVILA, J. **Effect of Cement and Saturation on the Stress-Strain Behavior of a Silty Clay**. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, April 2-6, 2006, Carefree, AZ, USA. v.1. p.1157 – 1168. 2006.

ROHLFES JÚNIOR, J.A. **Estudo do comportamento de um solo residual melhorado através de técnicas mecânicas e físico-químicas e sua aplicação à análise de fundações superficiais**. 1996. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1996.

ROMERO, E. **A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties**. *Engineering Geology*, v. 165, p. 3-19, 2013.

ROMERO, E.; DELLA VECCHIA, G.; JOMMI, C. **An insight into the water retention properties of compacted clayey soils**. *Géotechnique*, v. 61, n. 4, p. 313-328, 2011.

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*, v.53, n.5, p.493-502, 2003.

SANTOS, R.A.; ESQUIVEL, E.R. **Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil**. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 10, n. 5, p. 986-991, 2018.

SARRO, W.S.; ASSIS, G.M.; FERREIRA G.C.S. **Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil**. *Construction and Building Materials*, v. 272, p.1-8, 2021.

SARRO, W.S; FERREIRA, G.C.S. **Soil elastic modulus determined by Ultrasound tests**. *Soil and Rocks*, v.42, n.2, p.117-126. 2019.

SATYANAGA, A.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.-C.; WANG, J.-Y. **Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution.** Computers and Geotechnics, v. 48, p. 51–61, 2013.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N.C. **Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n. 10, p.857-868, out. 2001. American Society of Civil Engineers (ASCE). 2001.

SCHNELLMANN R.; RAHARDJO H.; SCHNEIDER H.R. **Controlling parameter for unsaturated soil property functions: validated on the unsaturated shear strength.** Canadian Geotechnical Journal, v. 52, n.3, p.374-381. 2015.

SELÇUK, L.; SEKER, V. **Predicting California bearing ratio of foundation soil using ultrasonic pulse velocity.** Proceedings of the institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, v. 172, n. 4, p. 320- 330. 2019.

SEVERO, R.N.F. **Caracterização geotécnica da falésia da ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente.** 2011. 228f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SHENG D.C., FREDLUND, D.G.; GENS, A. **A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables.** Canadian Geotechnical Journal, v. 45, n.4, p.511-53. 2008.

SHENG, D.C.; ZHOU, A.A.; FREDLUND, D.G. **Shear strength criteria for unsaturated soils.** Geotechnical and Geological Engineering, v.29, n.2, p.145-159. 2011.

SILVA, L.A. **Estudo experimental do comportamento de tensão, deformação e resistência de solos artificialmente cimentados.** 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVEIRA, P.E.D.; REIS, F.A.G. **Procedimentos de avaliação de solos colapsíveis por meio de correlação entre ensaios edométricos e ensaios SPT.** Revista Geociências, v. 40, n. 3, p. 651-660. 2021.

SOYLEMEZ, M. **Effect of soil particle and por orientations on sound velocity.** Innovative Infrastructure Solutions, v.3, n.37. 2018.

TAHERI, A.; SASAKI, Y.; TATSUOKA, F.; WATANABE, K. **Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression.** Soils and Foundations, v. 52, n.1, p.126-145, 2012.

TAHERI, A.; TATSUOKA, F.; **Stress-strain relations of cement-mixed gravelly soil from multiple-step triaxial compression test results.** Soils and Foundations, v. 52, n.4, p.748-766, 2012.

TEIXEIRA, I.; SARRO, W. DE S.; CARDOSO, S.M.; MACEDO, G.; FERREIRA, G.C. DOS S. **Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir de ensaios**

destrutivos e não destrutivos. Proc. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, ANPET, Ouro Preto, p. 196-207. 2015.

TOLL, D.G.; ONG, B.H. **Critical-state parameters for an unsaturated residual sandy clay.** Géotechnique, v. 53, n.1, p.93- 103. 2003.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAL, D.E; CLIFTON, A.W. **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.** Canadian Geotechnical Journal, v. 33, n.3, p. 379-392, 1996.

VANAPALLI, S.K; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. **Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till.** Geotechnique, v. 49, n.2, 1999.

VILAR, O.M.; RODRIGUES, J.E.; NOGUEIRA, J.B. **Solos colapsíveis: Um problema para a engenharia de solos tropicais.** In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, 1ª sessão, p.209-224.1981.

WANG, Y.H.; LEUNG, S.C. **A particulate-scale investigation of cemented sand behavior.** Can.Geotech.J. v. 45, n.1, p.29–44. 2008a.

WANG, Y.H.; LEUNG, S.C. **Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations.** Journal Geotech. Geoenviron. Eng. v. 134, n.7, p.992-1004. 2008b.

WATABE, Y.; LEROUEIL, S.; LE BIHAN, J.-P. **Influence of compaction conditions on pore-size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till.** Canadian Geotechnical Journal, v. 37, n. 6, p. 1184-1194, 2000.

YASUHARA, H.; NEUPANE, D.; HAYASKI, K.; OKAMURA, M. **Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation.** Soils and Foundations, v. 52, n.3, p.539-549, 2012.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; DAI, G. **Estimation of unsaturated shear strength from soil-water characteristic curve.** Acta Geotechnica, v.14, n.6, p.1977-1990. 2019a.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A; DAI, G.. **Role of the pore-size distribution function on water flow in unsaturated soil.** Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), v.20,n.1, p.10-20. 2019b.

ZHANG, T.W.; CUI, Y.J.; LAMAS-LOPES, F.; CALON, N.; D'AGUIR, S.C. **Compacted soil behaviour through changes of density, suction and stiffness of soils with remoulding water content.** Canadian Geotechnical Journal, v. 55, n. 2, p. 182-190, 2018.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ESTRUTURA DE UM SOLO TROPICAL RESIDUAL NO SEU COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO

Resumo: Os solos tropicais, presentes em regiões de clima quente e úmido, como é o caso do Brasil, possuem inúmeras propriedades e peculiaridades de comportamento resultantes de seus processos geológicos e pedológicos. As características peculiares de estruturação desses solos dificultam seu entendimento geotécnico, incluindo a compreensão de seu comportamento quanto ao colapso. Os fatores intervenientes na deflagração desse fenômeno são diversos e variáveis, de acordo com as particularidades comportamentais apresentadas por cada tipo de solo. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar a influência da estrutura na curva de retenção de água e no comportamento de um solo tropical residual argiloso quanto à compressibilidade e sua susceptibilidade ao colapso, analisando-se os fatores que intervêm em sua ocorrência. Para tal, foram produzidas, a partir de um mesmo solo, estruturas distintas por meio de diferentes técnicas de reconstituição e condições de umidade, considerando-se diferentes ligações entre as partículas, a saber, com e sem adição de cimento. As estruturas foram produzidas com os mesmos peso específico aparente seco e índice de vazios, mas com distintos teores de umidade. Para a caracterização dessas estruturas a nível microestrutural, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram realizados ensaios de caracterização física, mineralógica e química. Os dados experimentais da curva de retenção de água foram obtidos a partir da aplicação dos métodos de mesa de sucção, panela de Richards e papel filtro, em corpos de prova representativos de todas as estruturas avaliadas, e, para a modelagem das curvas, foi utilizado o software *SRWC Fit*. Para estudo da compressibilidade e suscetibilidade ao colapso, foram realizados ensaios edométricos incrementais, considerando-se diferentes níveis de tensão para promover-se a inundação nos corpos de prova representativos das referidas estruturas. Foram empregadas metodologias disponíveis na literatura técnica para a mensuração do potencial de colapso. As investigações dos efeitos de ciclos de umedecimento e secagem nas estruturas foram realizadas com base nos ensaios edométricos incrementais e adensamento com velocidade de deformação constante, tendo-se os ensaios de pulso ultrassônico como subsídio para a interpretação dos resultados. O ensaio de pulso ultrassônico também foi aplicado na investigação das diferenças do efeito da

cimentação artificial nas estruturas obtidas a partir das três técnicas de moldagem avaliadas. Os resultados encontrados apontaram para uma influência da forma de organização das partículas, do índice de vazios, da cimentação artificial e do teor de umidade na compressibilidade do solo e na suscetibilidade ao colapso, sendo esta suscetibilidade dependente da estrutura apresentada pelo solo e significativamente influenciada pelo teor de umidade. No que se refere à curva de retenção de água, essa influência se mostrou presente no comportamento a nível de macroporos, não sendo observadas variações nos microporos quanto à retenção de água em vista da variação da estrutura. Os modelos que apresentaram melhores correlações com os dados experimentais das curvas de retenção de água foram os em configuração bimodal de van Genuchten (dual-VG) e Kosugi (dual-KO), sendo satisfatória a aplicação de ambos. A rigidez promovida pela cimentação artificial foi distinta para as estruturas estudadas e se mostrou dependente da quantidade de água empregada no preparo das amostras. O potencial de colapso da estrutura identificada como mais propícia à ocorrência do fenômeno se mostrou dependente da tensão atuante no solo no instante da inundação, em conjunto com o índice de vazios e as alterações causadas pela cimentação artificial na micromorfologia. A capacidade da cimentação artificial em promover a preservação da estrutura original frente à ação de ciclos de umedecimento e secagem se mostrou variável com a técnica e teor de umidade aplicados para a moldagem dos corpos de prova.

Palavras-chave: solos tropicais; peculiaridades comportamentais; variação de estruturas; compressibilidade; colapso; curva de retenção de água.

1 INTRODUÇÃO

Em regiões tropicais, como é o caso do Brasil, cada tipo de solo possui propriedades físicas, químicas e morfológicas específicas, mas seu conjunto apresenta certo número de atributos comuns, podendo-se citar sua composição mineralógica (quartzo, caulinita, oxi-hidróxidos de ferro e alumínio), grande espessura e horizontes com colorações predominantemente amarelas ou vermelhas (Toledo *et al.*, 2000). Outro aspecto observado nos solos tropicais é o agrupamento (agregação) das partículas argilosas por ação cimentante dos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio em grumos de dimensões de silte, que conferem a esses solos comportamento laterítico (Gomes; Guimarães; Marques, 2018). É válido ressaltar que fatores ambientais, como

ciclos de umedecimento e secagem, podem ser inclusos como interferentes na agregação do solo (Carvalho, 1991; Maltoni, 1994).

Segundo Boszczowski (2008), nos solos residuais tropicais, as partículas e seus arranjos evoluem progressivamente como uma consequência do intemperismo, com ampla variedade de mineralogia, grau de cimentação e índice de vazios. Mahmood e Abrahin (2021) apontam que, além dos materiais finos cimentantes, um agente que possibilita essa ligação entre as partículas de solo são as forças de capilaridade e de adsorção ou sucção. Gomes, Guimarães e Marques (2018) afirmam que os solos tropicais possuem inúmeras propriedades e peculiaridades de comportamento resultantes de seus processos geológicos e pedológicos, o que faz com que apresentem comportamentos complexos que ainda carecem de estudos.

Segundo Falcão *et al.* (2023), no Brasil, é comum a ocorrência de solos lateríticos, não saturados e porosos, os quais, quando submetidos a um aumento de umidade (perda de sucção) nas camadas mais superficiais, acabam tendo seus comportamentos tensão-deformação alterados, comportamentos que são complexos, culminando em inúmeros problemas geotécnicos. Entre estes problemas, está o fenômeno de colapso do solo, que é atribuído a materiais que, sujeitos a variações do conteúdo de água, podem apresentar recalques diferenciais significativos (Falcão *et al.*, 2023).

Os solos colapsíveis estão presentes em diversas regiões do Brasil e do mundo (Vilar; Rodrigues; Nogueira, 1981). De acordo com Vandanapu, Omer e Attom (2017), os solos colapsíveis são metaestáveis, se encontram em condição não saturada e, por esta razão, quando entram em contato com a água, podem apresentar instabilidade ou quebra de sua estrutura. A inundação do solo está intrinsecamente relacionada à redução da sucção, sendo essa premissa identificada como um fator que desencadeia a compressão volumétrica decorrente do colapso (Li; Vanapalli; Li, 2016; Rodrigues; Soares; Sanchez, 2021). Segundo Gutierrez (2005), a colapsibilidade é consequência do arranjo estrutural dos solos que, por sua vez, é resultado direto de sua composição química e mineralógica, originada durante sua evolução intempérica.

Os depósitos de solos residuais colapsíveis são constituídos por partículas de distintos tamanhos, resultantes do intemperismo, produzidos pela desintegração mecânica e decomposição química das rochas locais. Nas camadas superficiais, são encontradas estruturas porosas que se originam da intensa lixiviação dos elementos solúveis e da concentração de óxidos de ferro e alumínio, responsáveis pela formação das frações finas do solo, pela ação das águas de percolação. Tais condicionantes resultam em altos índices de vazios, baixas massas específicas e estruturas instáveis dos solos (Gutierrez, 2005).

Na condição natural, isto é, condição de umidade do solo no campo que varia de acordo

com a sazonalidade meteorológica-atmosférica, os solos colapsíveis podem apresentar elevada resistência ao cisalhamento e baixa deformabilidade (Medero; Schnaid; Gehling, 2009). No entanto, suas estruturas metaestáveis colapsam em contato com a água, diminuindo seus volumes (Rezaei; Ajalloeian; Ghafoori, 2012; Nguyen; Hanna, 2021; Ogila; Eldamarawy, 2021). Em geral, os solos colapsíveis têm estruturas porosas caracterizadas por altos valores de índice de vazios (Falcão *et al.*, 2023).

Solos colapsíveis são considerados um dos tipos de solos classificados como problemáticos, ao lado de outros materiais de fundação enquadrados nessa mesma categoria, como os solos expansivos e as turfas (Kalantari, 2013). Esses solos representam sérios desafios para a engenharia e a geotecnia em todo o mundo, sendo formados naturalmente ou mediante interferência da ação do homem (Ian; Chris, 2012). Segundo Al-Shamoosi (2019), os solos colapsíveis são frequentemente considerados como um perigo natural. O autor ainda afirma que, mesmo após o processo de compactação mecânica, os solos colapsíveis, no geral, ainda apresentam graves problemas para obras geotécnicas.

Entre os problemas enfrentados na engenharia civil decorrentes da presença de solos colapsíveis, tem-se uma série de patologias, como as citadas por Garcia e Luiz (2019), a saber, recalques em estruturas de fundações, empenamento de esquadrias, trincas em alvenaria, elevado fissuramento em elementos estruturais e até mesmo a ruína em estruturas antigas que possuem fundação inadequada às condições específicas do solo.

Segundo Clemence e Finbarr (1981), solos colapsíveis ou metaestáveis são quaisquer solos na condição não saturada que sofrem um rearranjo de partículas e uma elevada perda de volume ao sofrer molhagem, com ou sem carregamento adicional. Para Medero, Schnaid e Gehling (2009), esses solos apresentam uma estrutura aberta que pode resistir a elevados níveis de tensão nas condições não saturadas, mas que colapsa ao ser molhada. Nesse sentido, um aspecto relevante de ser investigado e associado ao colapso é a forma como o arranjo promovido nas partículas do solo influencia nesse rearranjo promovido pelo fenômeno do colapso, considerando a possibilidade de essa forma de organização das partículas interferir no nível de tensão resistido por uma estrutura aberta na condição não saturada e na susceptibilidade dessa estrutura sofrer ou não colapso.

Para que ocorra um colapso repentino pelo umedecimento, Ian e Chris (2012) afirmam que deve ser atingida uma condição em que as tensões atuantes excedam a resistência do solo após a redução da sucção e a dissolução de elementos de cimentação interpartículas. Tal afirmação indica que, para avaliar-se o fenômeno do colapso, a investigação da variação do

nível de ligação entre as partículas do solo é um aspecto relevante e que auxilia na compreensão deste fenômeno.

Abbeche *et al.* (2010) constataram experimentalmente que diversos solos colapsíveis sofrem mudanças repentinas de volume e colapsam quando o seu teor de umidade aumenta, com ou sem carregamento externo aplicado, não sendo necessária a saturação do solo para que este entre em colapso.

Diversos autores vêm estudando o potencial de colapso em solos compactados (Pereira; Fredlund, 2000; Lim; Miller, 2004; Jotisankasa; Ridley, Coop, 2007) e têm observado sua dependência do teor de umidade inicial, peso específico aparente seco e energia e processo de compactação adotados para o solo.

Outro fator que influencia no potencial de colapso de um solo é o arranjo do esqueleto sólido formado pelos grãos de solo. De acordo com Li, Vanapalli e Li (2016), corpos de prova de um mesmo solo compactados em diferentes teores de umidade apresentam diferentes potenciais de colapso, mesmo apresentando mesmos peso específico aparente seco, mineralogia e textura.

Segundo Kalantari (2013), o nível do colapso é geralmente função de diferentes parâmetros, incluindo partículas do solo, permeabilidade, grau de saturação, índice de vazios inicial, razão de pré-adensamento e espessura da camada de solo. De acordo com Ian e Chris (2012), as características típicas de solos que sofrem colapso são uma estrutura aberta instável, elevada porosidade, pequena densidade seca, elevado índice de vazios, fracas forças de ligação entre as partículas, um depósito de solo com alta sensibilidade, um depósito de solo jovem alterado, entre outros. Murthy (2010) ainda indica que o nível ou quantidade de colapso é função das proporções relativas dos fatores que influenciam no fenômeno.

Vários aspectos podem ser avaliados para caracterizar o comportamento de solos colapsíveis. Segundo Mahmood e Abrahin (2021), um desses aspectos é a quantidade de água presente no solo, sendo que a variação no grau de saturação influencia na suscetibilidade de ocorrência do fenômeno. Outro aspecto citado pelos autores é a ação da capilaridade que produz no solo pequenas, mas fortes, forças de ligação que influenciam na resistência ao cisalhamento. Os autores ainda apresentam, como aspectos que caracterizam o comportamento desses solos, o aumento progressivo da compressibilidade, acompanhado por uma progressiva redução da resistência ao cisalhamento após a molhagem, e o fato de o colapso estar relacionado a uma tensão de ruptura máxima no cisalhamento.

Pesquisas recentes, como as de Fattah e Dawoo (2019) e Abdalhusein, Akhtarpour e Mahmood (2019, 2021) mostram que, em todos os tipos de solo colapsível, o potencial de

colapso aumenta com o aumento da quantidade de água para uma mesma tensão de inundação, devido a uma redução na sucção matricial. Fattah *et al.* (2014) e Mahmood (2018) afirmam que o grau de saturação inicial é considerado um dos principais fatores que influenciam o comportamento colapsível de um solo no estado não saturado. Os autores ainda afirmam que o potencial de colapso reduz com a elevação da densidade do solo. Ng e Menzies (2007) apontam que, entre os principais motivos que levam à ocorrência do colapso, estão a deformação do solo e a redução da resistência ao cisalhamento devidas à inundação.

Existem critérios teóricos, baseados em correlações com índices físicos, e ensaios de laboratório e de campo que permitem estudos acerca dos solos colapsíveis. Os ensaios de laboratório permitem reproduzir condições mais controladas para a mensuração do colapso, conforme relatado por Rezaei, Ajalloeian e Ghafoori (2012) que destacam que o estudo dos solos colapsíveis é realizado de forma mais adequada a partir de ensaios de laboratório.

O efeito da cimentação no solo também contribui para o estudo da colapsibilidade por alterar as condições de ligação interpartículas. Segundo Kalantari (2013), alguns solos colapsíveis são solos fofos, mas estáveis, contendo ligações de contato bem cimentadas com um agente de ligação solúvel em água, de modo que, sob certas condições de carregamento e molhagem, produzem colapso da estrutura do solo com elevada variação do índice de vazios. De acordo com Schanz e Karim (2018), para alguns solos, o potencial do colapso também está associado à destruição da cimentação existente entre as partículas do solo quando este é submetido a umedecimento e carregamento.

Para que sejam possíveis estudos mais abrangentes acerca da influência da estrutura no comportamento hidromecânico de um solo residual potencialmente colapsível, é necessário analisar aspectos intrinsecamente ligados à estrutura (Silveira; Reis, 2021), tais como a influência da cimentação e do nível da cimentação do solo, o que permite uma melhor abordagem do efeito das ligações de contato entre as partículas na estrutura do solo.

Dessa forma, em pesquisas envolvendo amostras deformadas considerando distintos processos de moldagem, análises envolvendo solo natural e com a adição de baixos teores de cimento permitem que se produzam diferentes estruturas com distintos graus de cimentação entre as partículas. Assim, é permitida uma investigação mais apurada do efeito da água no colapso, no que se refere à redução promovida na cimentação entre as partículas em diferentes estruturas.

Em relação ao estudo de solos colapsíveis no Brasil, pesquisadores como Vilar e Rodrigues (2011) e Benatti, Rodrigues e Miguel (2013), ao investigarem o potencial de colapso de solos brasileiros, afirmaram que a estrutura tem influência determinante no comportamento

que os solos colapsíveis apresentam. A estrutura dos solos, incluindo-se o arranjo dos grãos no arcabouço sólido e as ligações entre partículas, é identificada como a propriedade física mais importante dos solos naturais (Jiang *et al.*, 2015).

Segundo Rabot *et al.* (2018), a estrutura do solo é reconhecida por controlar muitos processos, entre eles os aspectos de retenção de água e infiltração. Dessa forma, o estudo da curva de retenção de água é um subsídio de elevada relevância em investigações que envolvem análises de diferentes estruturas de um mesmo solo.

De acordo com Sousa, Motta e Coutinho (2021), um comportamento peculiar dos solos tropicais representado pela curva de retenção de água é seu formato bimodal, com macroporos e microporos que controlam os fluxos de entrada e saída de água. Feuerharmel, Gehling e Bica (2006) explicam que esse comportamento típico é resultado da frequente agregação de partículas que desenvolvem essas duas classes de poros contrastantes.

A curva de retenção de água constitui uma ferramenta através da qual os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos não saturados podem ser melhor compreendidos, a partir de uma análise das variações no teor de água em relação à sucção do solo (Fredlund; Rahardjo, 1993; Rahardjo; Kim; Satyanaga, 2019). Entretanto, é válido ressaltar que esta compreensão não é algo simples devido às diversas variáveis envolvidas e às peculiaridades inerentes a cada solo.

Zhang, Zhang e Xu (2020) afirmam que interpretar o efeito da sucção na microestrutura e na condutividade hidráulica não é simples devido à complexidade envolvida no processo de infiltração. Outro aspecto válido de ser ressaltado é o fato de a microestrutura se manter preservada apesar da ação de esforços de compactação, os quais produzem alterações apenas a nível de macroestrutura (Carvalho *et al.*, 2015; Duong *et al.*, 2016; Heidemann *et al.*, 2016; Neto *et al.*, 2018).

Alguns parâmetros hidráulicos dos solos não saturados necessários para analisar o movimento da água no solo podem ser determinados ajustando-se curvas de retenção de água por meio de funções matemáticas, ou seja, modelos hidráulicos do solo (Seki, 2007).

Vários modelos empíricos e teóricos foram propostos na literatura para representar a função de retenção de água no solo $[\theta(h)]$ em sua forma funcional, considerando um número específico de parâmetros para estimativa do conteúdo de água do solo a partir da sucção no solo (Brooks; Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Durner, 1994; Kosugi, 1996; Poulsen *et al.*, 2002). Alguns desses modelos foram obtidos pela combinação de expressões para a função de retenção de água com modelos estatísticos de distribuição de poros que

consideram que os solos são compostos de um feixe de tubos capilares (Burdine, 1953; Mualem, 1976).

Entretanto, muitos solos apresentam característica de porosidade dupla ou múltipla, como é o caso dos solos tropicais residuais, conforme previamente abordado. No estudo de Seki, Toride e van Genuchten (2022), os autores apresentaram equações de retenção de água multimodal com aplicabilidade prática. Especificamente, a equação dual-BC (Brooks e Corey)-CH (*common head*) (DBC), dual-VG (van Genuchten)-CH (DVC) e modelos KO (Kosugi)1BC2-CH (KBC) foram aplicados e validados para uma ampla gama de tipos de solo.

Além da curva de retenção de água, outro aspecto relevante no estudo da estrutura do solo é como alterações de uma estrutura pré-existente influenciam no comportamento do solo, considerando-se variações geradas pela ação de ciclos de umedecimento e secagem. Solos argilosos expostos às intempéries estão sujeitos às variações climáticas que promovem contração e expansão, o que favorece a criação de fissuras e, conseqüentemente, promove aumento significativo de permeabilidade (Maciel, 2003). Entende-se que a perda de umidade decorrente da evaporação ocorre das camadas mais superficiais para as mais profundas, de forma que as áreas mais secas começam a contrair e criar forças de tração, as quais desenvolvem sucção irregularmente distribuída e acabam criando fissuras (Kodikara; Barbour; Fredlund, 2002; Tang *et al.*, 2010). Considerando que variações sazonais de precipitação e temperatura são fatores considerados preponderantes em determinadas regiões, investigações sobre aspectos ligados a esses ciclos são também pertinentes do ponto de vista prático.

Existem, na literatura, pesquisas voltadas para essas investigações. Um exemplo é o trabalho de Basma *et al.* (1996) que avaliaram as mudanças na microestrutura de uma argila por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura, antes e após os ciclos de umedecimento e secagem. Foi observado que os sucessivos ciclos de umedecimento e secagem levam a uma destruição gradual dos contatos da estrutura da argila, ao passo que proporciona uma reconstrução e reorientação da estrutura dos microagregados.

Gusmão (2020) afirma que o comportamento hidromecânico dos solos é bastante influenciado por ciclos de umedecimento e secagem. Além de alterações de textura e arranjo, muitos estudos demonstram que múltiplos ciclos promovem expansões volumétricas irreversíveis no solo (Basma *et al.*, 1996; Pires; Bacchi; Reichardt, 2005; Nowamooz; Masrouri, 2009; Chen; Ng, 2013; Tang *et al.*, 2016), o que, conseqüentemente, causa redução de densidade e resistência. Vale salientar que as mudanças na estrutura dependem significativamente da taxa de evaporação/infiltração e da profundidade do perfil (Li; Velde; Zhang, 2004), assim como do estado inicial do solo (Tang *et al.*, 2016).

Assim, em estudos nos quais procura-se compreender a influência da estrutura no comportamento hidromecânico de solos tropicais residuais, a abordagem referente a mudanças de comportamento desses solos devidas a alterações na sua estrutura decorrentes de variação da sucção pelos ciclos de umedecimento e secagem se fazem pertinentes.

Considerando a necessidade de se avançar na compreensão do comportamento geotécnico dos solos residuais tropicais, em níveis macro e microestrutural, a proposta da presente pesquisa é estudar o efeito da variabilidade estrutural de um solo residual tropical em suas respostas hidráulicas e mecânicas, subsidiada por análises microestruturais e mineralógicas, tendo-se a análise da susceptibilidade ao colapso como forma de se investigar a instabilidade apresentada por cada estrutura avaliada e a ação de ciclos de umedecimento e secagem como forma de se investigar os efeitos da alteração da estrutura no comportamento do solo.

Este estudo contempla investigações envolvendo o efeito da variabilidade da estrutura, considerando condições de solo natural e com a presença de cimentação artificial, avaliando-se estruturas com um mesmo peso específico aparente seco, mas com diferentes teores de umidade e variando-se o nível de cimentação entre as partículas. Três condições distintas de umidade foram aplicadas na busca para se compreender como a estrutura apresentada por um solo influencia na compressibilidade e na colapsibilidade, associada a uma análise dos parâmetros que influenciam no potencial de colapso, e de que forma ciclos de umedecimento e secagem alteram tais parâmetros. Além disso, buscou-se avaliar como as variações no arranjo dos grãos e nas ligações entre partículas influenciaram na forma como é dada a propagação de ondas ultrassônicas e no comportamento quanto ao efeito da sucção, avaliando-se, a partir de determinações de curvas de retenção de água, os efeitos a nível de macroestrutura e microestrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Solo

O solo selecionado, de ocorrência expressiva na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, consiste em um solo residual maduro de gnaiss, pedologicamente classificado como Latossolo

Vermelho-Amarelo, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, aspecto poroso, com granulometria argilo-areno-siltosa (Resende *et al.*, 2007). A classificação do solo segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996), é LG', o que indica um comportamento laterítico.

Para a caracterização química e a obtenção dos óxidos que compõem o solo, foi empregada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), cujos resultados são apresentados na Tabela 1. Além dos dados do FRX, na tabela também consta o valor de perda ao fogo.

Tabela 1: Caracterização química do solo por FRX e perda ao fogo

Composição química do solo residual adotado (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl	PF*
27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	11,49

*Perda ao fogo

Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023)

Através dos resultados da Tabela 1, é possível constatar um predomínio dos compostos sílica e alumina e uma quantidade significativa de óxido de ferro. Para os óxidos alcalinos e alcalinos terrosos (CaO, MgO e K₂O), foram constatados baixos teores.

No que se refere aos óxidos e à sílica identificados, segundo Bressani (2004), a presença de tais elementos é uma das razões para a formação e manutenção de arranjos das partículas e microestruturas. A análise desse aspecto será feita mais à frente, em conjunto com o estudo da influência da estrutura no comportamento da curva de retenção, quando as análises envolvendo micro e macroporos das estruturas serão abordadas.

Em relação ao estudo da colapsibilidade, Lawton, Fragszy e Hetherington (1992), em uma pesquisa envolvendo o comportamento colapsível de alguns solos, enumeraram, entre os principais fatores responsáveis por este comportamento, a presença de agentes de ligações intergranulares ou cimentantes que tornam o solo estabilizado em condições não saturadas, apontando, como um desses agentes, o óxido de ferro. O fenômeno do colapso, segundo Custódio (2009), está relacionado tanto à quebra da estrutura quanto à perda de sucção devidas à inundação. Considerando que o solo adotado apresenta óxido de ferro em sua composição química (Tabela 1), é possível estimar que uma das causas do colapso observado nas estruturas investigadas nesta pesquisa, que se mostraram suscetíveis ao colapso, esteja associada à ruptura dessas ligações enfraquecidas pelo efeito da água, que elimina a estabilidade gerada por essas ligações em condição não saturada.

Além do FRX, para a caracterização química do solo, foi realizada a determinação do pH do solo em água de acordo com os procedimentos prescritos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017). O valor de pH obtido para o solo estudado foi 5,63.

A caracterização mineralógica do solo foi obtida a partir da técnica de Difração de Raios-X (DRX), utilizando o difratômetro *Bruker D8 Discover* com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), com o ângulo 2θ variando de 5° a 55° , utilizando passo de $0,05^\circ$ em uma aquisição de 1 segundo por passo. A Figura 1 apresenta os resultados do DRX.

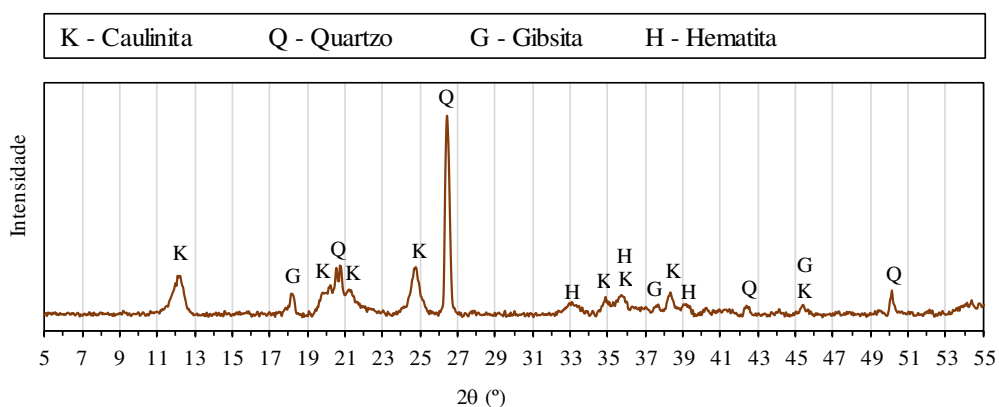


Figura 1: Difratograma do solo adotado na pesquisa.
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023)

Analisando o difratograma da Figura 1, foram identificados os seguintes minerais: caulinita, quartzo, gipsita, hematita. A presença desses minerais na amostra avaliada coincide com os resultados encontrados por Trindade (2006), Crispim (2010) e Dias Neto (2020) para solos da mesma região. Assim como a maioria dos solos brasileiros, devido a sua formação ter ocorrida em condições tropicais (EMBRAPA, 2017), o solo avaliado nesta pesquisa é caulínítico, o que, segundo Lopes *et al.* (2019), pode ser definido pelo fato deste solo ter como seus principais constituintes a caulinita e o quartzo (Figura 1) e, conseqüentemente, elevados níveis de SiO_2 e Al_2O_3 terem sido detectados (Tabela 1).

Outro aspecto que pode ser observado através do difratograma do solo (Figura 1) é a presença de mais picos, e de maior intensidade, da caulinita, quando comparados aos picos da gipsita. Uma possível explicação para tal resultado, considerando a afirmação de Pereira *et al.* (2020), consiste no fato de que a proporção entre caulinita e gipsita é, de modo geral, inversamente relacionada, em que a gipsita representa o mineral dominante em solos muito alterados e depósitos de bauxita, e a caulinita é o mineral dominante nas zonas menos intemperizadas. A presença da caulinita ainda é justificada pelos fatores que favorecem sua formação, como os citados por Resende *et al.* (2014), a saber, clima quente e úmido, com

drenagem livre, mas sem uma lixiviação excessiva, e baixo pH. O solo selecionado se enquadra em tais fatores ao observar-se o fato de este ter sido formado em um país de clima tropical (Brasil) e apresentar um pH ácido (baixos valores).

Para a caracterização microestrutural do solo, foi empregada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por elétrons secundários. Na Figura 2, são apresentadas as micrografias obtidas a partir do MEV que mostram que o solo possui granulação fina (Figura 2a), com predomínio de partículas de diâmetros menores que $2\mu\text{m}$ e com forma lamelar (Figura 2b). É válido ressaltar que os resultados obtidos através das imagens do MEV (Figura 2) corroboram os resultados obtidos no ensaio de granulometria, que também identificou predomínio de fração argila no solo (Figura 10 a seguir).

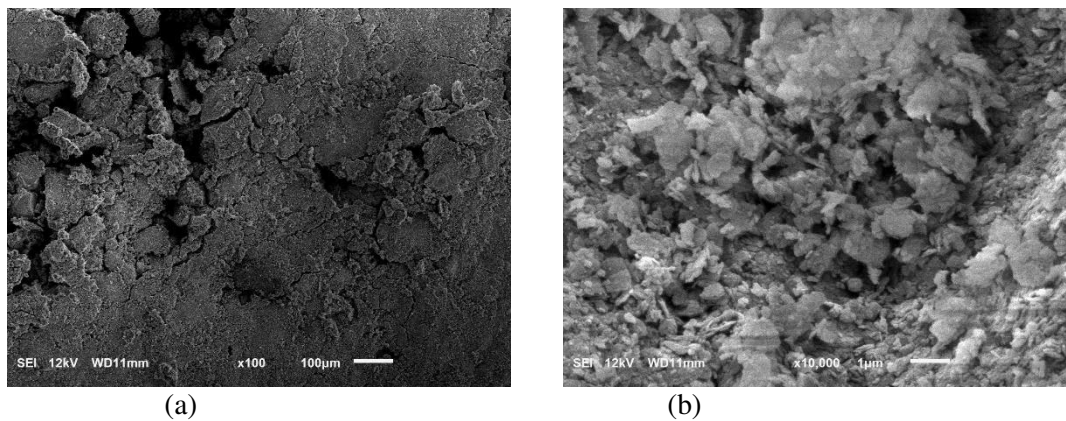


Figura 2: Micrografias do solo pesquisado obtidas por MEV: (a)x100; (b)x10.000.
Fonte: (Autoria própria, 2024)

A curva de compactação Proctor Normal do solo foi obtida seguindo-se as diretrizes da D698 (ASTM, 2021a) e é apresentada na Figura 3.

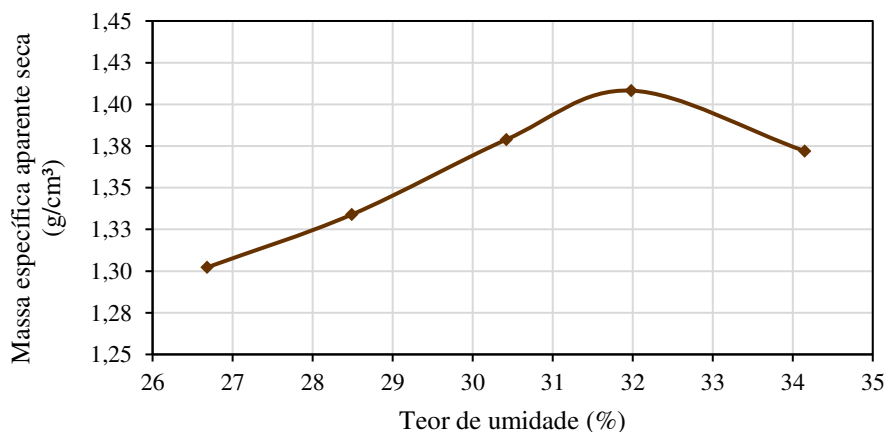


Figura 3: Curva de compactação Proctor Normal do solo argiloso investigado
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023)

2.1.2. Cimento Portland

Como material cimentante a ser adicionado ao solo, foi adotado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), por sua alta reatividade inicial, fator que evita a ocorrência de reações tardias entre cimento e solo. Na Tabela 2, são apresentados os resultados da caracterização física do cimento.

Tabela 2: Caracterização física do cimento CPV-ARI.

Ensaio	Normas Técnicas	Resultados
Massa Específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,065 g/m ³
Área Específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)	1892 m ² /kg
Índice de finura	NBR 11579 (ABNT, 2013)	0,1 %
Consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018a)	32,8 g
Expansibilidade	NBR 11582 (ABNT, 2016)	Frio – 0,2 mm
		Quente – 0,1 mm
Tempo de Pega	NBR 16607 (ABNT, 2018b)	Início – 15:04
		Fim – 15:58
Resistência à Compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019a)	3 dias – 45,6 MPa
		7 dias – 50,0 MPa
		28 dias – 61,0 MPa

Fonte: (Autoria própria, 2024)

A caracterização mineralógica do cimento foi obtida a partir da técnica de Difração de Raios-X (DRX), utilizando-se o mesmo equipamento e as mesmas considerações de ensaio adotadas para o solo. A Figura 4 apresenta os resultados do DRX do cimento.

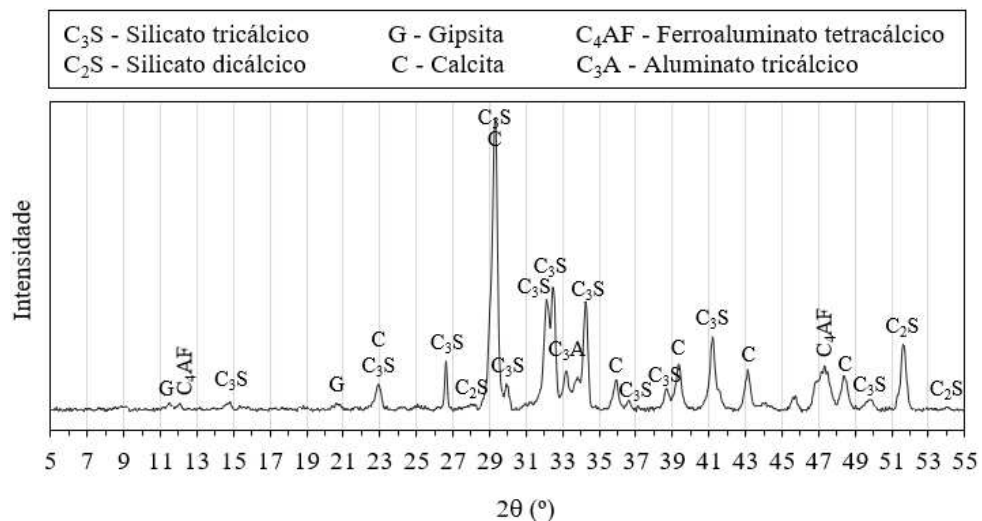


Figura 4: Difratograma do cimento CPV-ARI adotado na pesquisa.

Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023)

Com base na análise do difratograma da Figura 4, foram identificados picos referentes aos cristais alita (C_3S), belita (C_2S), aluminato (C_3A) e ferrita (C_4AF), e às fases cristalinas calcita (CaO) e gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Além disso, foi possível observar a presença de picos significativos de alita (C_3S), o que já era esperado para um cimento CPV, pois sua quantidade determina a resistência do cimento Portland nas idades iniciais (Taylor, 1997; Lu *et al.*, 2018; Ouzia; Scrivener, 2019).

2.2. Métodos

2.2.1. Produção das amostras e moldagem dos corpos de prova

2.2.1.1 Amostras para caracterização geotécnica e microestrutural

Para os ensaios geotécnicos e de pH, foram preparadas amostras deformadas de solo natural e de misturas de solo com 2% de cimento, conforme o procedimento apresentado por Pereira *et al.* (2023), através das etapas a seguir:

1. Amostras de solo natural foram separadas e determinado o seu teor de umidade pelo método da estufa;
2. Em sacos plásticos, foram preparadas amostras com 2% de cimento em relação à massa seca do solo e, em sequência, as amostras eram homogeneizadas;
3. Nas amostras de solo com cimento, foi adicionada água destilada em quantidade suficiente para que fosse atingido o teor de umidade ótimo do ensaio Proctor Normal realizado no solo natural ($w = 31,9\%$);
4. Em sequência, as amostras eram homogeneizadas, passando-as em uma peneira para garantir uma homogeneização completa;
5. Após estarem devidamente homogeneizadas, as amostras foram novamente colocadas em sacos plásticos e fechadas hermeticamente para que fosse garantida total vedação, evitando-se perda de água para o ambiente;
6. Os sacos eram então armazenados em ambiente de temperatura controlada, e as amostras eram curadas por um período de 7 dias;
7. Passado o período de cura, eram secas ao ar até próximo da umidade higroscópica;
8. Após a secagem das amostras, os torrões eram desmanchados, tendo-se o cuidado de evitar a quebra dos grãos, e, em seguida, as amostras eram novamente homogeneizadas para que fosse garantida sua representatividade;

9. Visando a padronização do processo para que fosse permitida a replicabilidade, todo o processo de mistura e homogeneização do solo, cimento e água era realizado em até, no máximo, 10 minutos.

Especificamente para o ensaio de massa específica dos grãos, considerando os procedimentos normativos da D854 (ASTM, 2014), foram separados 250g dessa amostra seca ao ar e homogeneizada (após realizado o passo 8). Desta quantidade, parte foi destinada para a determinação do teor de umidade, e uma outra quantidade era tomada e colocada no picnômetro, tal que a massa seca fosse em torno de 50g.

No caso dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade segundo a D4318 (ASTM 2017), das amostras secas e homogeneizadas obtidas após os 8 passos apresentados, uma fração foi tomada e passada na peneira de 0,42mm de modo que fossem obtidos 200g de material passado, conforme recomendação da norma dos ensaios.

Para a realização dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foram preparados corpos de prova conforme condições apresentadas no item 2.1.1.2. Após a moldagem, e o período de cura no caso dos corpos de prova com 2% de cimento, foram coletados fragmentos representativos desses corpos de prova, montados em *stubs* do MEV e revestidos com ouro por pulverização catódica em um Quorum Q150RS.

2.2.1.2 Corpos de prova para os ensaios de adensamento, curva de retenção de água e pulso ultrassônico

Para o estudo do efeito da estrutura nas propriedades de retenção de água e na compressibilidade do solo tropical residual adotado e, conseqüentemente, no comportamento deste solo frente ao fenômeno do colapso, foram produzidas amostras de solo com estruturas distintas, com e sem a adição de cimento, criando-se estruturas com ligações diferenciadas entre as partículas do solo.

De acordo com Mitchell e Soga (2005), o processo de reconstituição tem por objetivo produzir amostras com organização do esqueleto sólido (*fabric*) e ligações entre os contatos (*structure*) mais similares umas às outras. Nesta pesquisa, que visa um estudo comparativo entre distintas estruturas, foram aplicadas três condições de moldagem, das quais as amostras partiram de valores de umidade distintos.

As amostras preparadas com menor teor de umidade (LW) foram obtidas por compressão hidrostática, e as outras duas por compressão edométrica, sob compactação

estática, variando-se as condições de umidade, sendo consideradas a umidade ótima de referência (OW) e a umidade próxima ao limite de liquidez do solo (HW), cujos procedimentos de moldagem serão descritos a seguir.

O parâmetro adotado como referência para o preparo das amostras foi o teor de umidade ótimo $w_{ot} = 31,9 \%$ obtido através da curva de compactação Proctor Normal do solo natural (Figura 3). Os corpos de prova foram moldados com o mesmo índice de vazios (e) e peso específico aparente seco (γ_d), porém com teores de umidade distintos.

Para que fossem obtidas amostras com estruturas com diferença de cimentação entre as partículas, foram preparadas amostras de solo natural (SN) e amostras com a cimentação artificial (SC). A adição de cimento buscou produzir, nas estruturas obtidas por uma mesma técnica de reconstituição, diferenças entre as ligações entre os grãos, quando rearranjados em condições distintas de umidade, porém com um mesmo peso específico aparente seco. Isso permite fazer análises comparativas do efeito da cimentação para cada uma das estruturas produzidas pelas diferentes condições de reconstituição empregadas. As amostras com cimentação artificial foram preparadas com um teor de 2% de cimento. Segundo Khalid *et al.* (2021), para gerar apenas uma estruturação no solo, devem ser adotados baixos teores de cimento num intervalo de 0 a 3%, motivo pelo qual adotou-se 2% no presente trabalho.

Com o objetivo de obter amostras representativas da estrutura do solo no ramo seco da curva de compactação (LW), foi empregada a técnica de reconstituição por compressão hidrostática e foi adotada uma umidade correspondente a 3% abaixo da umidade ótima ($w_{ot} - 3\%$) para umedecimento do solo. Para a obtenção das amostras representativas da estrutura no ramo úmido (HW), foi adotada a técnica de reconstituição por compressão edométrica, partindo de porções de solo com um valor de umidade correspondente ao seu limite de liquidez. A técnica de reconstituição por compressão edométrica sob carregamento estático também foi empregada para as amostras preparadas no teor de umidade ótimo (OW). Os detalhes do preparo das amostras pelas três técnicas e das distintas condições de moldagem são apresentados na sequência.

Com o objetivo de se obter uma estrutura aberta e um elevado índice de vazios, o que proporciona condições mais adequadas para o estudo do colapso e permite que sejam obtidas amostras de maior compressibilidade, utilizou-se inicialmente a técnica de reconstituição por compressão hidrostática, partindo-se de uma amostra de solo no estado fofo e com umidade representativa do ramo seco. A partir dessa técnica, foram obtidos os parâmetros tomados como referência (γ_d , e) para a produção das amostras preparadas na umidade ótima e acima da umidade ótima, partindo-se do limite de liquidez.

Para a moldagem dos corpos de prova por compressão hidrostática, as amostras de solo com e sem adição de cimento, com o teor de umidade $w_{ot} - 3\%$, foram depositadas em um molde de PVC cilíndrico com 8 cm de diâmetro e 18,5 cm de altura, tendo-se um controle da massa úmida do solo depositada, de maneira que fosse atingido sempre o mesmo peso específico aparente seco (Figura 5a). Dentro desse tubo de PVC, foi colocada uma membrana de látex de 3 polegadas e aplicado um vácuo para que fosse garantida a aderência da membrana ao tubo.

Durante o processo de preparo das amostras, o tubo foi mantido erguido sobre um disco perfurado em um suporte de madeira, no qual foi colocado um *top cap* suspenso para que a amostra não fosse comprimida por ele (Figura 5b). O uso do disco perfurado permitiu a ocorrência de drenagem durante o período em que o corpo de prova era submetido à compressão hidrostática.

Em sequência, era retirada a membrana de látex, de modo a envolver o *top cap* e o disco, e colocados *orings*, prendendo essa membrana para que fosse garantida total vedação do corpo de prova. Após a colocação do corpo de prova dentro da câmara de compressão, estando este apoiado em um berço para que fosse garantida a total integridade da amostra (Figura 5c), a base perfurada era conectada ao topo da câmara por uma mangueira, permitindo-se a drenagem.

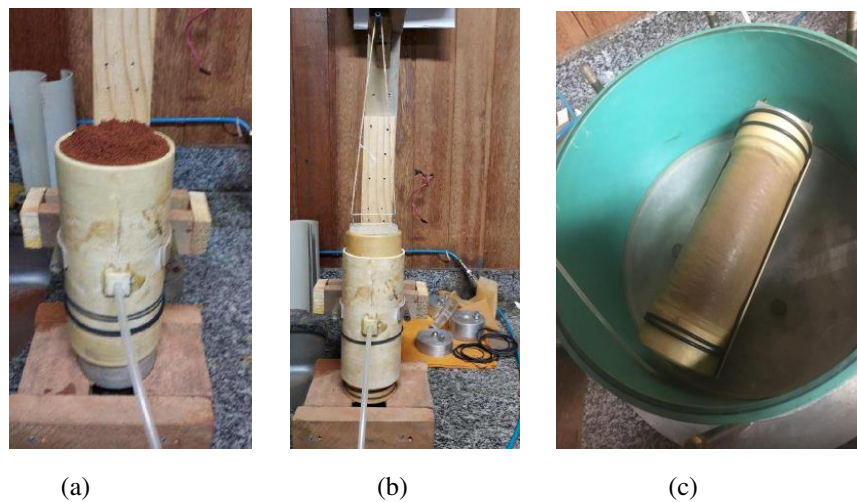


Figura 5: Preparo de amostras para reconstituição por compressão hidrostática: (a) moldagem da amostra no tubo de PVC; (b) tubo de PVC suspenso no suporte; (c) amostra no berço colocada dentro da câmara hidrostática.

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Após a amostra ser colocada dentro da câmara de compressão (Figura 5c), era colocada água na câmara até que a amostra fosse totalmente coberta. Após o fechamento e total vedação da câmara, aplicava-se uma pressão de 200 kPa na câmara. A seleção por esse nível de pressão foi baseada em observações experimentais que indicaram que, para as configurações e o tipo

de solo adotados, este foi o maior nível de pressão que não promoveu furos ou ruptura da membrana durante o período de aplicação da compressão hidrostática nos corpos de prova. Para maiores níveis de pressão, a redução das dimensões do corpo de prova era mais expressiva, o que gerava uma tendência de dobra da parte da membrana que não estava em contato com o corpo de prova e a consequente movimentação do *top cap* e da base, o que, associado à pressão aplicada, promovia furos e rasgos na membrana, ocasionando a perda do corpo de prova.

Além disso, essa condição de pressão permitiu a obtenção de corpos de prova com elevado índice de vazios, mas sem gerar uma condição de estado fofo que dificultasse seu manuseio, estado este que poderia ser obtido mediante aplicação de um menor nível de pressão que produzisse um corpo de prova mais fofo. Assim, com o nível de pressão adotado neste trabalho, foi possibilitada a movimentação e talhagem de corpos de prova com a menor interferência possível na estrutura gerada.

O período empregado foi de sete dias, período este testado e considerado ideal para uma total dissipação do excesso de poropressão. Esse período de sete dias foi aplicado para os corpos de prova de solo com e sem cimento.

Ao final desse período, a moldagem dos corpos de prova a serem ensaiados era realizada a partir da parte central da amostra produzida por compressão hidrostática (Figura 6a), com o intuito de minimizar os efeitos de borda. Após a moldagem dos corpos de prova, tendo por base os anéis da célula do ensaio edométrico, foram determinados seus parâmetros geotécnicos, compreendidos pelo teor de umidade, peso específico aparente seco e índice de vazios (Figura 6b).

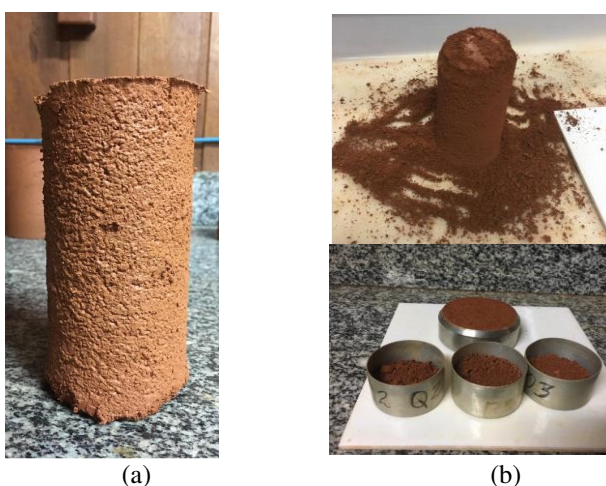


Figura 6: Corpos de prova reconstituídos por compressão hidrostática: (a) após retirada da câmara hidrostática; (b) talhagem de corpo de prova em anel para ensaio edométrico.

Fonte: (Autoria própria, 2024)

A obtenção de uma estrutura no ramo úmido da curva de compactação, com o mesmo índice de vazios obtido pela técnica de reconstituição por compressão hidrostática, só que na

condição saturada, foi realizada a partir da técnica de reconstituição por compressão edométrica, partindo-se de uma amostra de solo com um teor de umidade próximo ao limite de liquidez (LL) do solo.

Para a obtenção dos corpos de prova, foi utilizada a aparelhagem cujo corte esquemático é apresentada na Figura 7, constituída por um anel guia e uma tampa de PVC com um orifício superior. A amostra, com teor de umidade próximo do LL, era gradualmente comprimida, sendo permitida a saída do excesso de água, até que fosse atingida a altura correspondente ao γ_d estipulado, ou seja, igual ao obtido por reconstituição hidrostática.

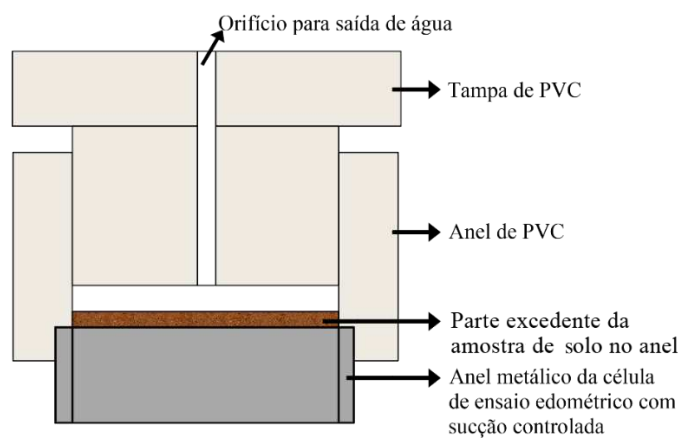


Figura 7: Corte esquemático do molde de PVC
Fonte: (Adaptado de Oliveira, 2018)

Para a produção dos corpos de prova no teor de umidade ótimo do ensaio de compactação na energia Proctor Normal (Figura 3) e a partir do teor de umidade correspondente ao LL, foi empregada a técnica de compressão edométrica. Nesse processo, foi considerado o mesmo γ_d adotado para as demais condições de moldagem investigadas neste trabalho, para que a diferença da estrutura produzida fosse causada apenas pela forma do rearranjo das partículas e pelo teor de umidade da amostra.

É válido ressaltar que os corpos de prova produzidos na umidade ótima e acima da umidade ótima (ramo úmido, partindo-se da condição de lama), com adição de cimento, foram embaladas com papel filme, guardadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e levadas para uma câmara úmida durante um período de cura de 7 dias. Esse foi o mesmo período a que as amostras preparadas com umidade abaixo da ótima (ramo seco) e obtidas por reconstituição hidrostática foram submetidas dentro da câmara de compressão hidrostática.

2.2.2. Caracterização geotécnica e microestrutural das estruturas

Para a caracterização geotécnica do solo tropical argiloso estudado e das variações causadas pela presença da cimentação artificial nestes parâmetros, considerando-se a adição de 2% de cimento Portland CPV-ARI, foram realizados os ensaios listados na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaios de caracterização geotécnica

Ensaios	Norma técnica
Granulometria completa	D7928 (ASTM, 2021b)
Limites de Atterberg	D4318 (ASTM, 2017)
Massa específica dos grãos	D854 (ASTM, 2014)

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Para a investigação do pH do solo natural e do solo com cimentação artificial, como forma de obter-se um subsídio para a compreensão das reações entre o solo argiloso e o cimento, foi utilizado um peagâmetro e foram considerados os procedimentos prescritos pela EMBRAPA (2017).

A caracterização microestrutural dos corpos de prova gerados a partir de amostras preparadas com umidade abaixo da ótima (LW), na umidade ótima (OW) e acima da umidade ótima (HW), nas condições de solo natural e solo com cimentação artificial, foi dada a partir da aplicação da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por elétrons secundários. No caso da investigação da microestrutura do solo com cimentação artificial, foram considerados corpos de prova com cura de 7 dias.

2.2.3. Ensaio Edométrico Incremental

Para o estudo da influência da estrutura na compressibilidade do solo tropical residual adotado, foram realizados ensaios do tipo edométrico incremental de acordo com as diretrizes da D2435 (ASTM, 2020).

Com o objetivo de avaliar a colapsibilidade do solo durante a execução de alguns ensaios edométricos incrementais, foram realizadas inundações dos corpos de prova submetidos a diferentes níveis de tensão. Esse procedimento visou estudar a influência da redução da sucção na rigidez do solo, com e sem cimento, e a ocorrência ou não de colapso, para avaliar as diferentes estruturas das amostras e observar a influência da estrutura no fenômeno do colapso.

Para que essa análise fosse mais abrangente, foram selecionadas, inicialmente, tensões, considerando-se pontos extremos de cada trecho, sendo um no trecho de recompressão (12kPa)

e outro no trecho de compressão virgem (1600 kPa), para que fosse avaliado o colapso tanto no regime de pequenas deformações quanto no de grandes deformações. Também foi avaliada a condição de inundação dos corpos de prova antes do carregamento inicial da prensa (0 kPa).

Além dessas condições, foi realizado o ensaio com a tensão de inundação de 200 kPa, por ser esta a tensão de referência para análise do colapso apontada por Jennings e Knight (1975) e para o cálculo do Índice de Colapso segundo o protocolo normativo da D5333 (ASTM, 2003). Em seus estudos envolvendo colapso, Mahmood e Abraham (2021) explicam que o Índice de Colapso é a porcentagem relativa do nível de colapso medido e estimado à tensão de 200 kPa.

Nas estruturas nas quais foram constatadas as ocorrências mais significativas do colapso, visando um estudo mais abrangente do potencial do colapso, foram avaliados mais três níveis de tensões de inundação, a saber, 100 kPa, 400 kPa e 800 kPa.

De posse dos dados obtidos através do ensaio endométrio incremental, foi calculado o potencial do colapso (PC) (Equação 1) conforme procedimento de cálculo apresentado pela D5333 (ASTM, 2003). É válido ressaltar que a metodologia adotada neste trabalho é a mesma desenvolvida por Jennings e Knight (1975), devido ao fato de os autores terem estudado o PC a partir de ensaios edométricos simples.

$$PC = \left(\frac{\Delta e_c}{1 + e_0} \right) * 100\% \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

Δe_c : variação do índice de vazios devido à inundação;

e_0 : índice de vazios inicial do corpo de prova.

O potencial de colapso ainda foi calculado considerando a metodologia proposta por Lutenegeger e Saber (1988), cujo cálculo (Equação 2) é apresentado abaixo. A diferença dessa metodologia de cálculo daquela presente na D5333 (ASTM, 2003) e proposta por Jennings e Knight (1975) é que, ao invés de se considerar como referência o índice de vazios inicial (e_0) apresentado pelo corpo de prova antes do ensaio, Lutenegeger e Saber (1988) consideram o índice de vazios apresentado pelo corpo de prova antes da inundação (e_i).

$$PC = \left(\frac{\Delta e_c}{1 + e_i} \right) * 100\% \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

Δe_c : variação do índice de vazios devido à inundação;

e_i : índice de vazios do corpo de prova antes da inundação.

Como parte do estudo do efeito de ciclos de umedecimento e secagem no comportamento do solo quanto à compressibilidade e à suscetibilidade ao colapso, foi realizado o ensaio de adensamento edométrico incremental. Para tal, foi considerada a realização do ensaio sem estágios de inundação e inundado à tensão de 200 kPa, em corpos de prova da estrutura que apresentou maior suscetibilidade ao colapso nas condições descritas no item 2.2.5 e identificadas como secagem e ciclagem.

2.2.4. Curva de retenção de água

A determinação das curvas de retenção de água no solo foi realizada por processo de secagem (drenagem), através das técnicas da Mesa de Sucção e da Câmara de Richards, empregando-se o princípio da translação de eixos, com as sucções de 0 a 10 kPa e de 20 a 1500 kPa, respectivamente. Para a determinação das curvas de retenção, considerando-se níveis de sucção mais elevados, foi empregada a técnica do Papel Filtro. A determinação das curvas de retenção seguiu as diretrizes preconizadas pelas normas D6836-16 (ASTM, 2016a) e D5298-16 (ASTM, 2016b).

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas a partir de amostras preparadas na umidade ótima, abaixo da umidade ótima e acima da ótima próxima ao LL (a partir do estado de lama), com e sem adição de cimento, para que fossem observados os efeitos da estrutura e da cimentação artificial quanto ao comportamento do solo frente à retenção de água.

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos, foi empregado o *software SWRC Fit* desenvolvido por Seki (2007) e disponível no link <https://seki.webmasters.gr.jp/swrc/>. A opção pelo uso do software mencionado baseou-se no fato de este estar disponível com fácil acesso, além de permitir o ajuste dos dados experimentais para distintos modelos de forma simultânea. Além disso, segundo Seki (2007), é possível realizar o ajuste não linear das curvas de retenção

e permitem-se ajustes de modelos multimodais, além dos consagrados modelos unimodais presentes na literatura. Considerando que, a partir dos dados experimentais, foi observado o comportamento bimodal do solo avaliado, essa opção de análise dentro do software foi de grande relevância para sua aplicação nos estudos referentes à presente pesquisa.

Além disso, o *SWRC Fit* contempla atualmente as equações multimodais de retenção de água e de condutividade hidráulica propostas por Seki *et al.* (2022) e que se mostraram eficazes para os estudos de diferentes tipos de solos. Seki *et al.* (2023) confirmam a flexibilidade dos modelos selecionados e concluem que as formulações de modelo propostas são muito úteis para aplicações práticas e ainda são matematicamente consistentes e relativamente simples.

No que se refere à seleção do modelo mais adequado, Seki (2023) ressalta que a seleção do modelo depende de sua finalidade. De acordo com o autor, se o objetivo for apenas a descrição da curva de retenção de água, pode-se realizar o ajuste dos dados simultaneamente para vários modelos e selecionar o modelo, observando o desempenho do ajuste ao considerar o coeficiente de determinação R^2 , o AIC (*Akaike Information Criterion*) e as curvas ajustadas. Tal estratégia foi adotada na presente pesquisa, considerando as premissas do autor do *SWRC Fit* (Seki, 2023) e também o fato de que o critério de informação Akaike (AIC) consiste em uma métrica que mensura a qualidade de um modelo estatístico, visando também sua simplicidade. Segundo McElreath (2016) e Taddy (2019), o AIC fornece uma métrica para comparação e seleção de modelos, na qual menores valores de AIC indicam uma maior qualidade e simplicidade do modelo para os dados em análise.

A Tabela 4 apresenta todos os modelos de ajustes, juntamente com a identificação das equações apresentadas no *software*, testados com os dados experimentais obtidos para as estruturas LW, OW e HW, com e sem cimentação artificial, estudadas neste trabalho. No artigo de Seki (2007), todas as equações e parâmetros apresentados na Tabela 4 são detalhadamente explicados.

Tabela 4: Modelos de ajuste da curva de retenção de água

Modelo testado no <i>SWRC Fit</i>	Equação
Brooks e Corey	$S_e = \begin{cases} (h/h_b)^{-\lambda} \\ 1 \end{cases} \begin{cases} (h > h_b) \\ (h \leq h_b) \end{cases}$
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - 1/n)$
Kosugi	$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right] \quad Q(x) = \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})/2$
Fredlund e Xing	$S_e = \left[\frac{1}{\ln[e + (h/a)^n]} \right]^m$
Bimodal- Brooks e Corey (dual-BC)	$S_e = \begin{cases} w_1(h/h_{b1})^{-\lambda_1} + (1 - w_1)(h/h_{b2})^{-\lambda_2} \\ w_1(h/h_{b1})^{-\lambda_1} + 1 - w_1 \\ 1 \end{cases} \begin{cases} (h > h_{b2}) \\ (h_{b1} < h \leq h_{b2}) \\ (h \leq h_{b1}) \end{cases}$
Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	$S_e = w_1[1 + (\alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1} + (1 - w_1)[1 + (\alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2}$ $(m_i = 1 - 1/n_i)$
Bimodal- Kosugi (dual- KO)	$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right]$ $Q(x) = \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})/2$

Fonte: (Adaptado de Seki, 2007)

2.2.5. Ensaio edométrico com deformação controlada (CRS)

Para o estudo do efeito de ciclos de molhagem e secagem na compressibilidade do solo estudado, optou-se por realizar ensaios de adensamento com taxa de deformação constante (CRS: *Constant Rate of Strain*), por se tratar de um método rápido de determinação dos parâmetros de compressibilidade das estruturas, possibilitando a análise de um maior número de variáveis. Além disso, para fins de análise comparativa, foram ensaiados corpos de prova não submetidos à ciclagem.

O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da D4186 (ASTM, 2012), tendo como objetivo a obtenção da curva de compressibilidade nas diversas condições avaliadas. Previamente à realização do ensaio, os corpos de prova foram saturados por 24 horas, adotando-se uma contrapressão de 100 kPa. A velocidade empregada para a realização do ensaio foi de 0,010 mm/min, a qual foi definida com base em testes experimentais com diferentes valores de velocidade e considerada adequada para a obtenção das curvas de compressibilidade.

No que se refere aos ciclos de umedecimento e secagem, alguns corpos de prova produzidos a partir de amostras preparadas na umidade ótima e abaixo da umidade ótima foram

submetidos a tais ciclos com o objetivo de se produzir um histórico de sucção nos corpos de prova com e sem adição de cimento. A aplicação desses ciclos não foi realizada em amostras produzidas com teor de umidade acima do ótimo, próximo ao LL (a partir do estado de lama), devido ao fato de que, nos ensaios preliminares, foram constatados o surgimento de diversas fissuras e uma danificação considerável dos corpos de prova, inviabilizando a realização do ensaio.

A investigação do efeito dos ciclos de umedecimento e secagem nos corpos de prova considerou dois processos. No primeiro, foi avaliado apenas o efeito da secagem, e no segundo, foi considerado o processo de umedecimento seguido por secagem, sendo, portanto, avaliado o efeito desses dois passos no corpo de prova.

Para análise do efeito da secagem, os corpos de prova, após moldagem, foram dispostos em posição vertical, conforme apresentado na Figura 8, de forma que ambas as faces ficassem em contato com o ar, e mantidos nessa posição, em ambiente com temperatura controlada de 25°C, pelo período de 24 horas. Os corpos de prova eram pesados imediatamente após a moldagem e posteriormente ao período de secagem, para determinação da massa de água perdida.



Figura 8: Secagem do corpo de prova para o ensaio CRS

Fonte: (Autoria própria, 2024)

No que se refere ao efeito do umedecimento, considerando que o corpo de prova seria submetido ao processo de saturação pelo próprio procedimento do ensaio, para que se tivesse um cenário distinto para essa representação, foi considerado um processo de umedecimento inicial e posterior secagem. A Figura 9 ilustra as fases dessa condição testada.



Figura 9: Etapas do processo de umedecimento e secagem: (a) saturação por capilaridade; (b) secagem à temperatura controlada
Fonte: (Autoria própria, 2024)

A primeira fase da condição de umedecimento e secagem foi o umedecimento do corpo de prova por um período de 24 horas, na qual foi promovida a saturação por capilaridade (Figura 9a) e com o auxílio de uma pipeta, para que fosse evitada uma interferência abrupta na estrutura do corpo de prova, em ambiente com controle da temperatura. A segunda etapa consistiu na secagem do corpo de prova (Figura 9b) em ambiente com temperatura controlada de 25°C, durante o período de 48 horas. Esse intervalo foi adotado com base em observações experimentais, permitindo que o corpo de prova atingisse condições de secagem que garantissem seu manuseio de forma mais fácil, evitando-se danos que gerassem alterações na estrutura.

2.2.6. Ensaio de pulso ultrassônico

O ensaio do pulso ultrassônico foi aplicado visando a investigação da influência da estrutura do solo e da cimentação na propagação da velocidade de ondas longitudinais do pulso ultrassônico, nas estruturas obtidas a partir de amostras preparadas na umidade ótima, abaixo da umidade ótima e acima da umidade ótima (a partir do estado de lama), considerando-se os tempos de cura de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Além dessa finalidade, o ensaio foi utilizado como subsídio para a compreensão das variações causadas pelos ciclos de umedecimento e secagem nos corpos de prova utilizados nos ensaios CRS. É válido ressaltar que, por se tratar de um ensaio não destrutivo, os mesmos corpos de prova submetidos ao ensaio ultrassônico foram utilizados no ensaio CRS.

As configurações, procedimentos e equipamento adotados foram similares aos empregados para o desenvolvimento do estudo apresentado no Capítulo 3 deste trabalho e publicado por Pereira *et al.* (2023).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o indicador digital ultrassônico não destrutivo portátil (PUNDIT), cujos transdutores possuem uma frequência de 54 kHz. A configuração de arranjo dos transdutores adotada no ensaio foi a correspondente ao método direto, o qual, segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019b), maximiza a transmissão e o recebimento da energia do pulso ultrassônico pelo corpo de prova.

Para a execução do ensaio, as faces dos corpos de prova, envoltos por uma película de papel filme totalmente aderida, eram parcialmente cobertas com uma camada de gel à base de água, e os transdutores do PUNDIT eram acoplados e firmemente pressionados nas superfícies dos corpos de prova. O equipamento era então acionado e ondas longitudinais de pulso ultrassônico eram geradas através dos corpos de prova. Depois de percorrida a distância referente à altura dos corpos de prova, o PUNDIT realizava a medição do tempo de viagem de onda e fornecia o valor da velocidade de propagação do pulso ultrassônico. Este procedimento de ensaio foi realizado por outros pesquisadores para registro da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (Sarro; Ferreira, 2019; Selçuk; Seker, 2019; Nalon *et al.*, 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Parâmetros para moldagem dos corpos de prova

Os resultados do ensaio Proctor Normal com o solo natural serviram de base para a definição dos valores de umidade de referência para a moldagem dos corpos de prova. A partir da curva de compactação (Figura 3), na qual foi obtida uma umidade ótima para o solo (w_{ot}) de 31,9%, foram preparadas amostras, com e sem cimentação artificial, pela técnica de reconstituição hidrostática em um teor de umidade de 28,9% ($w_{ot} - 3\%$), conforme descrito em 2.2.1.

Após o período de sete dias na câmara de compressão hidrostática, para que fosse garantida a dissipação do excesso de poropressão e um período de cura padronizado para os corpos de prova com 2% de cimento, foram obtidos corpos de prova com um valor médio de peso específico aparente seco (γ_d) de 11,18 kN/m³, para os corpos de prova de solo natural, e de 10,77 kN/m³, para os corpos de prova com solo com adição do cimento CPV-ARI.

Tendo como referência os parâmetros obtidos pela técnica de reconstituição hidrostática (γ_d ; e), foram moldados corpos de prova por reconstituição edométrica, considerando duas condições de preparo das amostras, variando-se o teor de umidade. A primeira foi a condição

em que os corpos de prova foram moldados no teor de umidade ótimo de 31,9 %. Para a segunda condição, buscando-se obter uma estrutura representativa do ramo úmido e na condição saturada, a obtenção das amostras com maior teor de umidade partiu de uma porção do solo umedecida com 56,04%, a qual foi posteriormente comprimida edometricamente até atingir os mesmos parâmetros obtidos com a técnica de reconstituição hidrostática (γ_d ; e).

Dessa forma, foram produzidos, para cada condição avaliada de ligação entre as partículas, com e sem cimentação artificial, corpos de prova com três diferentes estruturas, com distintos teores de umidade, mas com os mesmos peso específico aparente seco e índice de vazios, ou seja, estruturas em que a diferença se encontrava na forma como os grãos de solo se organizam, no esforço gerador dessa organização e na quantidade de água nos vazios. Os corpos de prova de solo natural apresentaram um índice de vazios de 1,50, e os corpos de prova de solo com cimento, um índice de vazios de 1,60.

3.2. Caracterização geotécnica e microestrutural

Na Figura 10, são apresentadas as curvas granulométricas do solo natural e do solo com adição de 2% de cimento, obtidas com e sem o uso do defloculante.

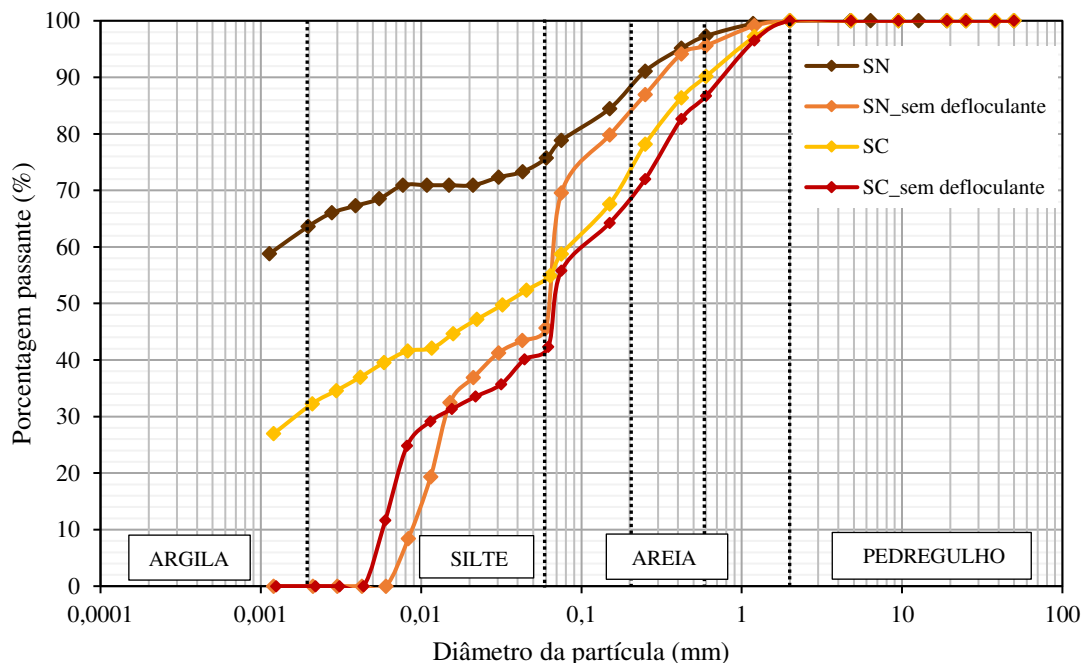


Figura 10: Curvas granulométricas: solo natural e solo com 2% de cimento
Fonte: (Autoria própria, 2024)

A Figura 10 apresenta a granulometria do solo natural e permite confirmar que se trata de um solo argilo-areno-siltoso, no qual tem-se 64% de fração argila, 12% de fração silte, 24% de fração areia e 0% de fração pedregulho.

Através da análise das curvas, é possível observar que a adição de cimento promoveu alteração na granulometria do solo argiloso natural, deslocando-a para o lado de partículas de maiores dimensões (mais grosseiro). Esse deslocamento é resultado da flocculação das partículas do solo natural devida à ação do agente cimentante.

Utilizando um peagâmetro e adotando os procedimentos prescritos pela EMBRAPA (2017), foi determinado o valor do pH do solo natural (pH = 5,63) e do solo com 2% de cimento (pH = 9,20), indicando a formação de um meio básico (pH > 7) devida à adição de cimento. Essa elevação do pH, em conjunto com o aumento da concentração eletrolítica da água intersticial e a redução da espessura da dupla camada difusa, são responsáveis pelo fenômeno de flocculação (Pereira *et al.*, 2023). As reações de flocculação resultaram em aglutinação das partículas finas do solo, formando agregados com dimensões maiores, o que explica a redução percentual das partículas finas e o aumento percentual de partículas grossas apresentados na curva do solo com 2% de cimento comparativamente à curva do solo natural.

No que se refere ao comparativo entre curvas com e sem uso do defloculante, a Figura 10 permite observar uma diferença considerável entre os resultados das amostras preparadas com água em relação às amostras com o uso do defloculante químico, tanto para a condição de solo natural quanto para a condição de solo com cimento. Essa diferença entre as curvas granulométricas é o indicativo da presença de agregações no solo, conforme já observado por outros autores, como Sousa *et al.* (2021). Tanto para as curvas de solo natural quanto para as curvas de solo com cimento, ao comparar-se as curvas obtidas de maneira tradicional com as curvas obtidas sem o uso do defloculante, é possível observar que as partículas do tamanho argila e silte estão aglomeradas no tamanho areia fina. De acordo com Pinto (2020), essas agregações, torrões de silte+argila, ratificam a natureza laterítica do solo. É válido ressaltar que a natureza laterítica do solo também foi identificada pela classificação MCT, conforme apresentado no item 2.1.1.

A Tabela 5 apresenta os resultados de ensaios de caracterização geotécnica realizados em amostras de solo natural e solo com cimento.

Tabela 5: Caracterização geotécnica do solo natural e solo com 2% de cimento.

Ensaios	Normas Técnicas	Resultados - SN	Resultados – SC 2%
Massa específica dos grãos	D854 (ASTM, 2014)	$\rho_s = 2,855 \text{ g/cm}^3$	$\rho_s = 2,765 \text{ g/cm}^3$
Limite de Liquidez	D4318 (ASTM, 2017)	80%	53%
Limite de Plasticidade	D4318 (ASTM, 2017)	43%	37%
Índice de Plasticidade	-	37%	16%

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando os resultados da Tabela 5, é possível perceber que a adição de cimento ao solo promoveu uma redução do valor médio da massa específica dos sólidos (ρ_s) e da plasticidade do solo. Em relação a ρ_s , esta é influenciada pela composição química e estrutura cristalina dos minerais que determinam a densidade dos grãos. Neste contexto, é possível considerar que a variação da ρ_s , devida ao acréscimo de cimento, esteja ligada à variação da mineralogia decorrente da mistura de materiais (solo e cimento) que possuem composições mineralógicas distintas, alterando a densidade final dos grãos da mistura.

Em relação à plasticidade, Caputo (2015) aponta a granulometria com um dos fatores que influenciam diretamente no Índice de Plasticidade (IP) do solo. Assim, considerando-se os resultados de granulometria das curvas com defloculante, foi observada uma redução da fração argila devida à adição do cimento (Figura 10), fator que provavelmente influenciou na redução do IP.

No que se refere à caracterização microestrutural das estruturas obtidas com umidade abaixo da ótima (LW), na umidade ótima (OW) e com umidade acima da ótima partindo da condição de lama (HW), nas condições de solo natural (SN) e solo com cimentação artificial (SC), são apresentados, na Figura 11, os resultados obtidos através do MEV.

Observando-se, de forma comparativa, as imagens da Figura 11, supõe-se que as variações quanto ao processo de reconstituição dos corpos de prova, a quantidade de água presente em cada amostra e a presença ou não da cimentação artificial foram fatores que influenciaram na variação da micromorfologia de cada estrutura gerada, o que resultou em estruturas diferentes para cada condicionante avaliado.

Entretanto, similaridades quanto aos aspectos microestruturais de cada estrutura avaliada são passíveis de identificação. O primeiro é a presença de dois níveis estruturais, macroporos e microporos, em todas as estruturas (LW, OW, HW, solo natural e solo com cimento), o que é indicativo da distribuição bimodal de poros, uma característica marcante dos solos lateríticos brasileiros (Otálvaro *et al.*, 2016; Neto *et al.*, 2018, Santos; Esquível, 2018). Assim, o processo de moldagem e a presença ou não de cimentação artificial, apesar de gerar alterações micromorfológicas, não alteraram o aspecto bimodal do solo, conforme será detalhado no item 3.5 a partir dos resultados das curvas de retenção de água.

A segunda similaridade está ligada ao grau de intemperismo experimentado pelo solo. Em todas as imagens, é possível observar a formação de agregações de partículas que originam macroporos, aspecto observado para solos altamente intemperizados e distinto dos solos pouco intemperizados, nos quais têm-se partículas organizadas em formas de pacotes isolados (Carvalho *et al.*, 2015). Esse resultado converge com os resultados dos ensaios de

granulometria com e sem defloculante (Figura 10), que também indicaram a presença de agregações no solo.

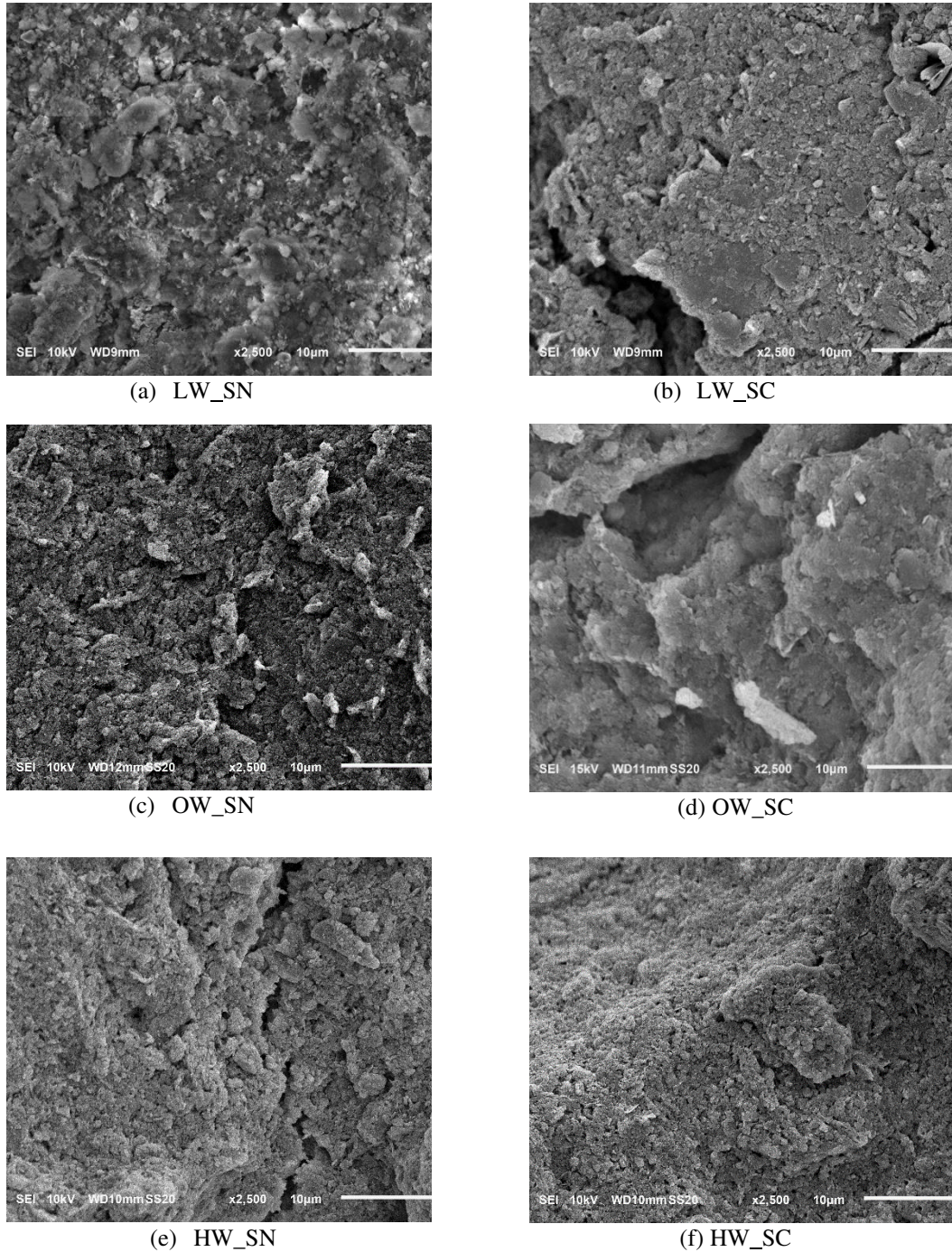


Figura 11: Micrografias das estruturas obtidas com aproximação x2500: (a) LW_SN; (b) LW_SC; (c) OW_SN; (d) OW_SC; (e) HW_SN; (f) HW_SC

Fonte: (Autoria própria, 2024)

No que se refere aos aspectos diferenciais da micromorfologia de cada estrutura, nas estruturas LW, Figura 11 (a) e (b), foi observada a presença de fissuras que podem ser

relacionadas a uma porosidade altamente comunicante, sendo presentes de forma mais expressiva na microestrutura do solo com cimento. Conforme será discutido nas análises do colapso (item 3.3), essa característica microestrutural de porosidade altamente comunicante consiste em um dos fatores que contribuíram para a suscetibilidade da estrutura LW à ocorrência do colapso.

As estruturas OW, Figura 11 (c) e (d), apresentam uma morfologia na qual é possível observar a presença de microporos e macroporos, tendo-se a presença de macroporos maiores na estrutura com cimento, provavelmente devida ao fato de esta estrutura apresentar um maior índice de vazios. É válido ressaltar que não foi observado, nas imagens obtidas através do MEV, o indicativo de conexão entre estes macroporos. Esta ausência de porosidade altamente comunicante pode ser uma das causas das estruturas obtidas OW não terem apresentado colapso, conforme será discutido no item 3.3.

Na Figura 11 (e) e (f), são apresentadas as imagens das estruturas HW, nas quais observa-se uma estrutura que apresenta um aspecto mais homogêneo, sem a presença de poros maiores e com uma maior orientação de partículas. Tais aspectos são decorrentes do processo de reconstituição a partir da condição de lama, no qual tem-se a condição de saturação do solo e, assim, os grumos formados são mais deformáveis e o processo de reconstituição produz estruturas mais uniformes, com maior grau de acomodação das agregações de partículas, resultando em vazios menores entre as agregações (Vanapalli, 2016; Zhang *et al.*, 2018; Zou *et al.*, 2018). Conforme será apresentado no item 3.3, os fatores citados explicam a não ocorrência de colapso nessa estrutura, considerando que essa microestrutura é contrária à condição metaestável.

Ao serem comparadas, de forma geral, as imagens da micromorfologia das estruturas estudadas (Figura 11), é possível inferir uma similaridade maior entre as microestruturas LW e OW (estruturas floculadas em condição não saturada) do que em relação à microestrutura HW (estrutura dispersa em condição saturada). Esse fato pode servir de subsídio para compreender as variações dos comportamentos dessas estruturas quanto à compressibilidade, cujos resultados serão discutidos no próximo item.

3.3. Estudo da compressibilidade e do colapso a partir de ensaios edométricos incrementais

Na Tabela 6, são apresentadas as condições iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de adensamento edométrico incremental, juntamente com os valores de tensão de pré-

adensamento determinados pelos métodos de Casagrande e de Pacheco Silva. Na Figura 12, são apresentadas as curvas de compressão edométrica dos corpos de prova, com e sem cimentação artificial, referentes às condições LW (obtida por compressão hidrostática com umidade abaixo da ótima), OW (obtida por compressão edométrica na umidade ótima) e HW (obtida por compressão edométrica com umidade acima da ótima), respectivamente.

Tabela 6: Condições iniciais dos corpos de prova submetidos ao ensaio edométrico incremental

Identificação do corpo de prova	Índice de vazios inicial (e_0)	Teor de umidade inicial (w_0)	Grau de Saturação inicial (S_{r0})	Tensão de Pré-Adensamento (σ'_{vm})	
				Casagrande (kPa)	Pacheco Silva (kPa)
LW_SN	1,504	28,9 %	54,8 %	570	590
OW_SN	1,500	31,9 %	60,7 %	90	79
HW_SN	1,500	52,5 %	100,0 %	-	-
LW_SC	1,605	28,9 %	51,6 %	295	280
OW_SC	1,602	31,9 %	56,9%	220	221
HW_SC	1,600	56,0 %	100,0 %	-	-

Fonte: (Autoria própria, 2024)

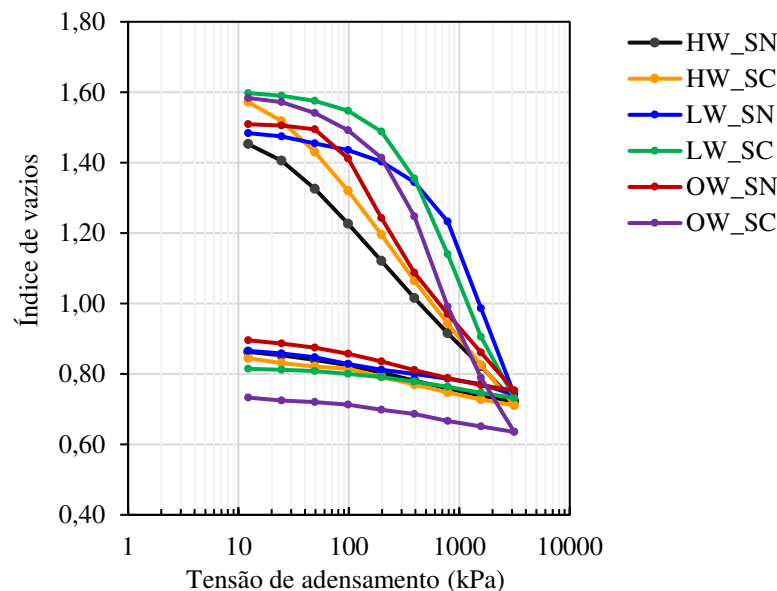


Figura 12: Curvas de compressão dos corpos de prova

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os resultados apresentados na Tabela 6 e na Figura 12 indicam que as três técnicas adotadas neste trabalho resultaram em estruturas diferentes e com comportamentos distintos frente à compressibilidade. Tais diferenças quanto ao comportamento já eram esperadas devidas às diferenças microestruturais constatadas pelo MEV (Figura 11).

Quanto aos resultados referentes à estrutura HW, através da Figura 12, é possível observar um trecho virgem bem definido e que compreende todo o intervalo de tensões analisado e a ausência de um trecho de recompressão bem definido, tanto para a estrutura de solo natural quanto para a estrutura com a presença de cimentação artificial. Considerando que os corpos de prova da estrutura HW foram moldados a partir de uma condição de lama, é provável que o processo de compressão edométrica, aplicado para a obtenção dos mesmos parâmetros (γ_d ; e) das outras estruturas investigadas, promoveu um pré-adensamento cujo nível de tensão foi muito baixo. Assim, considerando os níveis de tensões testados no ensaio e a possibilidade de a tensão inicial aplicada no ensaio ter sido superior à tensão aplicada durante o processo de moldagem dos corpos de prova, não foi possível identificar o trecho de recompressão e, por isso, pelos gráficos, não se identifica uma tensão de pré-adensamento bem definida.

O trecho virgem das curvas de compressão obtidas a partir de ensaios edométricos é caracterizado pela ocorrência de maiores deformações, diferentemente do trecho de recompressão no qual são observadas pequenas deformações (Amaya, 2017). Nessa linha, tem-se que os corpos de prova da estrutura HW apresentaram, desde a aplicação do primeiro carregamento do ensaio, maiores deformações. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de a microestrutura HW apresentar a condição de saturação do solo, de forma a se eliminar dos macroporos a parcela de sucção, reduzindo a rigidez da estrutura e, além disso, apresentar formação de grumos mais deformáveis (Zhang *et al.*, 2018; Zou *et al.*, 2018), conforme explicado nos resultados de MEV [Figura 11 (e) e (f)].

No caso das estruturas LW e OW, em que foi aplicada uma tensão de compressão hidrostática e empregado um esforço de carga estático durante a compressão edométrica, respectivamente, é possível observar, na curva de compressão, um trecho inicial bem definido, caracterizado por menores deformações (Figura 12). Possivelmente, tais resultados estão relacionados à ausência de deslocamentos significativos entre as partículas, sugerindo que estas estão submetidas a níveis de sollicitação menores em relação àqueles aos quais já foram submetidas. Ainda se observa um trecho de compressão virgem onde a aplicação das tensões resulta em maiores deformações nas estruturas dos corpos de prova LW e OW.

Outro fator que pode explicar essa diferença comportamental das estruturas LW e OW em relação à estrutura HW está na microestrutura. Os resultados de MEV (Figura 11) indicaram que as estruturas LW e OW possuem macroporos maiores do que a estrutura HW. Este fator, associado à presença de sucção nesses poros, já que as estruturas LW e OW estão em condição não saturada ($S_r < 100\%$, Tabela 6), proporcionou uma maior rigidez inicial a essas estruturas,

gerando uma maior capacidade resistiva frente aos primeiros carregamentos adotados, tendo como resultado uma melhor definição do trecho de recompressão.

Ainda analisando-se as curvas da Figura 12 e os dados expostos na Tabela 6, percebe-se que, de um modo geral, a estrutura LW se mostrou mais rígida do que a estrutura OW, tanto para o caso dos corpos de prova de solo natural quanto para os corpos de prova com adição de cimento. É provável que tal comportamento esteja ligado ao fato de que as condições de tensão para a produção dos corpos de prova LW podem ter sido de maiores níveis de tensão, o que resultou em maiores valores de tensão de pré-adensamento para as estruturas LW, e ainda ao fato de que as estruturas LW foram produzidas com menor teor de umidade do que as OW, gerando uma estrutura de menor grau de saturação e maiores níveis de sucção que promoveram maior rigidez.

Em relação ao efeito da cimentação artificial nas estruturas LW e OW, são observados comportamentos contrários. Ao avaliar os dados da Tabela 6, é possível perceber que os corpos de prova OW apresentaram maior nível de tensão de pré-adensamento quando aditivados com cimento, e os corpos de prova LW apresentaram maior nível de tensão de pré-adensamento para o solo natural. Estima-se que a razão desse comportamento esteja ligada à quantidade de água para a hidratação do cimento e às diferenças nos índices de vazios iniciais.

De acordo com Foppa (2005), a resistência de misturas promovidas entre solo e cimento é variável com a umidade de moldagem e ocorre devido a alterações geradas na estrutura do solo cimentado. O autor afirma que a quantidade de água utilizada na compactação exerce um papel fundamental na formação da estrutura, pois influencia diretamente as reações do cimento e o grau de orientação das partículas. Nas estruturas OW que foram preparadas com um maior teor de umidade (w_{ot}) do que as estruturas LW ($w_{ot} -3\%$), por apresentarem mais água disponível para as reações de hidratação do cimento, a cimentação artificial foi mais eficiente, gerando uma maior rigidez.

Dessa forma, o efeito da cimentação artificial foi mais significativo nessa estrutura, o que resultou no fato das estruturas OW com cimento apresentarem maior tensão de pré-adensamento que as produzidas com solo natural. Em contrapartida, no caso das estruturas LW, os resultados obtidos (Tabela 6) indicaram que a influência do índice de vazios foi mais significativa que a presença da cimentação artificial para estas estruturas. Assim, os corpos de prova com cimento, por apresentarem um índice de vazios maior do que os corpos de prova de solo natural, se mostraram mais frágeis e com menor tensão de pré-adensamento.

Para o estudo do efeito da estrutura na susceptibilidade do solo residual ao colapso, foram promovidas inundações dos corpos de prova durante o ensaio edométrico incremental

nas tensões de 0 kPa (ensaio inundado), 12 kPa, 200 kPa e 1600 kPa. Os resultados desses ensaios são apresentados através das Figuras 13, 14 e 15. A Tabela 7 apresenta os valores da variação do índice de vazios devido à inundação (Δe_c) e os valores de potencial de colapso (PC) calculados pelas metodologias da D5333 (ASTM, 2003) e Lutenegeer e Saber (1988), para cada uma das situações avaliadas.

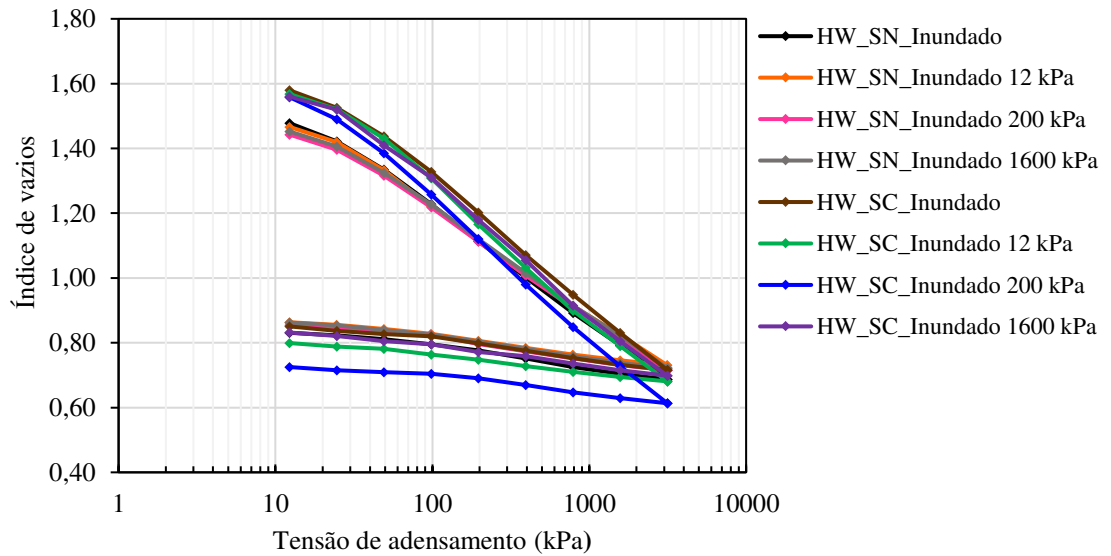


Figura 13: Curvas de compressão dos corpos de prova HW
Fonte: (Autoria própria, 2024)

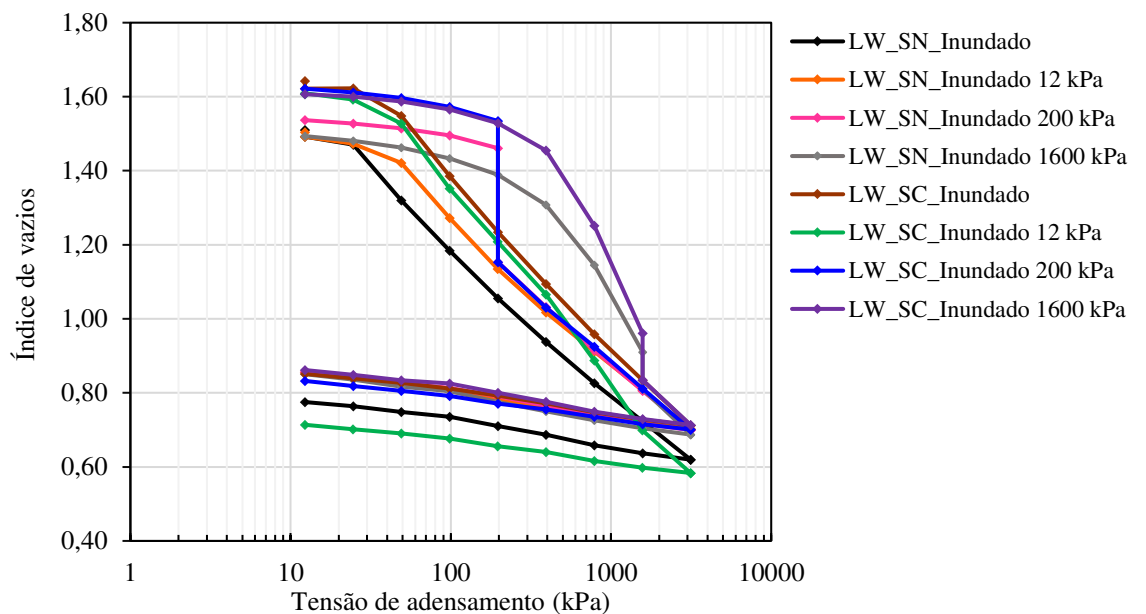


Figura 14: Curvas de compressão dos corpos de prova LW
Fonte: (Autoria própria, 2024)

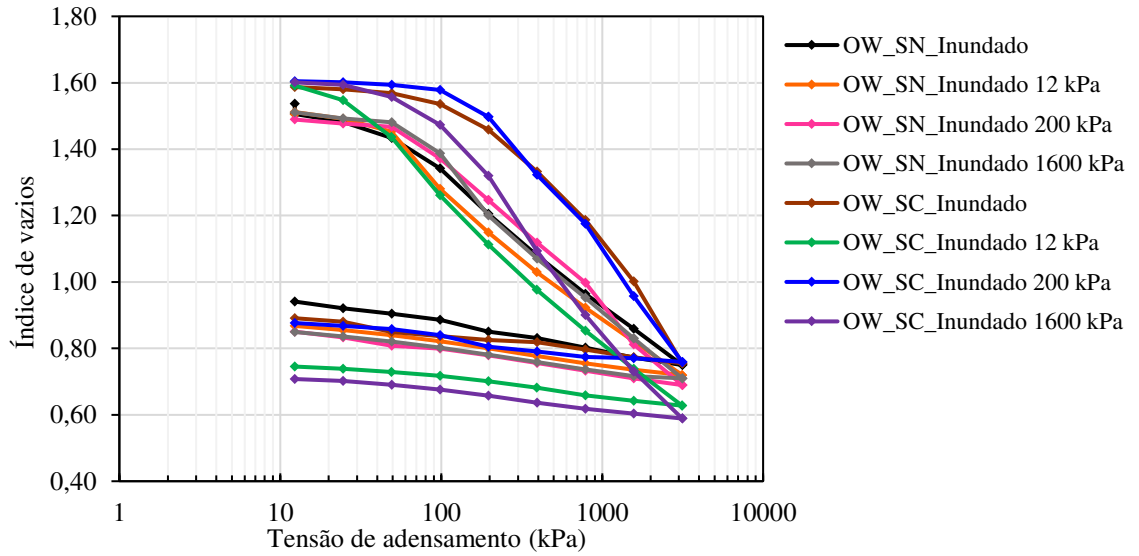


Figura 15: Curvas de compressão dos corpos de prova OW
 Fonte: (Autoria própria, 2024)

Tabela 7: Variação do índice de vazios devida à inundação (Δe_c) e potencial de colapso (PC) em diferentes níveis de tensão

Condição do solo	Estrutura investigada	Tensão de inundação (kPa)	Δe_c	PC (%)	
				D 5333 ASTM (2003)	Lutenegger e Saber (1988)
SOLO NATURAL	LW	0	0,029	1,14	1,14
	OW	0	-0,010	0	0
	HW	0	-	-	-
	LW	12	0,012	0,46	0,48
	OW	12	-0,007	0	0
	HW	12	-	-	-
	LW	200	0,330	12,96	13,41
	OW	200	0	0	0
	HW	200	-	-	-
	LW	1600	0,101	4,02	5,29
	OW	1600	0	0	0
	HW	1600	-	-	-
SOLO COM CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL	LW	0	0	0	0
	OW	0	0	0	0
	HW	0	-	-	-
	LW	12	-0,003	0	0
	OW	12	0,011	0,42	0,42
	HW	12	-	-	-
	LW	200	0,382	14,45	15,07
	OW	200	0	0	0
	HW	200	-	-	-
	LW	1600	0,126	4,81	6,43
	OW	1600	0	0	0
	HW	1600	-	-	-

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Com base na análise dos gráficos da Figura 13 e nos dados da Tabela 7, é possível observar que a estrutura HW, com e sem cimento, não apresenta colapso em nenhum dos níveis de tensão de inundação avaliados. Tal resultado pode ser explicado com base no fato de os corpos de prova estarem na condição saturada desde o início dos ensaios, em função do processo de reconstituição desse tipo de amostra. Considerando o conceito apresentado por Vilar e Rodrigues (2011), de que os solos colapsíveis podem apresentar uma diminuição significativa de volume devido ao aumento do grau de saturação e o fato dos corpos de prova HW já apresentarem grau de saturação de 100%, o resultado encontrado se justifica.

A análise dos resultados apresentados pelos corpos de prova LW e OW (Tabela 7) permite constatar a influência da forma de produção da estrutura, ou seja, do esforço gerador do rearranjo dos grãos e do teor de umidade, na maneira como o solo se comporta sob inundação.

Considerando as inundações promovidas antes do início do primeiro carregamento do ensaio (0 kPa – ensaio inundado) e a um baixo nível de tensão (12 kPa), no regime de deformações elásticas, é possível observar pequenas variações no índice de vazios (Tabela 7), positivas e negativas, tanto para os corpos de prova LW quanto para os OW, nas condições natural e com cimento. Tais valores, quando avaliados sob a perspectiva do parâmetro potencial de colapso (%), apresentaram magnitudes baixas, variando de $0 < PC < 1,14$. Além disso, outra possibilidade é que estas variações estejam ligadas à precisão das leituras dos extensômetros analógicos utilizados, sendo possível serem consideradas como desprezíveis.

O critério de Jennings e Knight (1975) qualifica a colapsibilidade do solo conforme a gravidade dos problemas esperados em obra, considerando a categoria de valores $0 < PC < 1$ como “sem problema”. Assim, é possível considerar que as condições citadas não são classificadas como problemáticas, visto que os valores de PC calculados foram muito baixos. A exceção se aplica à condição de solo natural para a estrutura LW, que apresentou $PC = 1,14\%$, podendo então ser considerada como levemente problemática pelo critério de Jennings e Knight (1975), que qualifica valores de $1 < PC < 5$ como “problema moderado”, sendo o valor obtido (1,14) extremamente próximo do limite inferior do intervalo dessa classificação.

A partir da análise dessas pequenas variações no índice de vazios devidas à inundação dos corpos de prova, distintas para cada estrutura estudada neste trabalho, é possível apontar algumas observações. As estruturas LW com solo natural (LW_SN) e OW com solo com cimento (OW_SC) apresentaram pequenas reduções do índice de vazios, e as estruturas LW com solo com cimento (LW_SC) e OW com solo natural (OW_SN) apresentaram pequenas expansões para a tensão de 12kPa. Tais comportamentos levaram à condição de as estruturas

LW_SN e OW_SC apresentarem potenciais de colapso, que, apesar de baixos, foram superiores aos apresentados por LW_SC e OW_SN, respectivamente.

Estima-se que a razão desse comportamento esteja ligada à rigidez apresentada pela estrutura, pois, ao considerar-se o fato de que a estrutura LW produzida com solo natural se mostrou mais rígida que a produzida com adição de cimento ao solo (Tabela 7 e Figura 14) e ao considerar-se que a estrutura produzida com OW com solo cimento se mostrou mais rígida que a com solo natural (Tabela 7 e Figura 15), percebe-se que as estruturas de maior rigidez apresentaram redução de índice de vazios. Assim, essa maior rigidez, associada a um baixo nível de tensão, possibilita a ocorrência de uma deformação maior do que a apresentada por um material menos rígido. Tal condicionante, associada à inundação, culmina na redução do índice de vazios e, conseqüentemente, no surgimento de um potencial de colapso.

Os resultados referentes às inundações promovidas às tensões de 200 kPa e 1600 kPa (regime de deformações plásticas para todas as estruturas avaliadas) indicaram a ocorrência de redução do índice de vazios apenas para estruturas LW (Figura 11) e em magnitude de deformação consideravelmente maior do que a observada para as inundações a 0 kPa e 12 kPa (Tabela 7). Esses resultados geraram maiores potenciais de colapso e sugerem uma influência do nível de tensão na magnitude das deformações que ocorrem no colapso dessas estruturas.

Se considerado o critério de Jennings e Knigh (1975), os valores de PC obtidos para as tensões de inundação de 200 kPa e 1600 kPa apresentaram diferentes classificações. Observando os valores da Tabela 7, percebe-se que LW, tanto para a condição de solo natural quanto para com cimento, apresentou PC classificado como “problema grave” ($10 < PC < 20$), para a tensão de inundação de 200 kPa, e como “problema moderado” ($1 < PC < 5$), para a tensão de inundação de 1600kPa.

Esses resultados indicam a influência da tensão na qual o corpo de prova é inundado sobre a intensidade do colapso apresentado. Na condição de inundação de uma tensão maior, o solo já se encontrava com um menor índice de vazios, devido ao acúmulo de deformações plásticas, sendo possível inferir a existência de poros de volume reduzidos na condição de inundação à tensão de 1600 kPa, comparativamente à condição dos poros do solo antes da inundação à 200 kPa.

O grau de saturação inicial é considerado o principal fator que influencia no comportamento do solo não saturado quanto ao colapso (Fattah; Al-Ani; Al-Lamy, 2014; Mahmood, 2018). Com base nessa premissa, é possível considerar que a ocorrência do colapso nas inundações a 200 kPa e 1600 kPa apenas para estruturas LW, provavelmente, está ligado ao fato de os corpos prova produzidos a partir das amostras abaixo da umidade ótima por

compressão hidrostática, que possuem os mesmos referenciais de peso específico aparente seco e índice de vazios dos corpos de prova da estrutura OW, apresentarem uma maior sucção associada ao menor grau de saturação (Tabela 5) dos corpos de prova LW, comparativamente aos OW.

Segundo Hounston *et al.* (2001), umedecer o solo sob carga enfraquece a cimentação, reduz a sucção do solo e causa colapso. Nesse sentido, ao promover a inundação nos corpos de prova obtidos por compressão hidrostática (LW), promoveu-se a queda da sucção devida à redução das forças de capilaridade, o que resultou no colapso (Figura 14).

Considerando-se a maior susceptibilidade ao colapso apresentada pelas estruturas produzidas por compressão hidrostática (LW) para as condições testadas, devida à estrutura metaestável aberta com elevado índice de vazios resultante da menor umidade e do processo de produção dessas amostras, foram avaliadas as inundações em mais três níveis de tensões, a saber, 100 kPa, 400 kPa e 800 kPa, conforme apresentado na Figura 16. Os resultados das análises microestruturais feitas através do MEV com ampliação x1000, nas estruturas LW, com e sem cimento, são apresentadas na Figura 17.

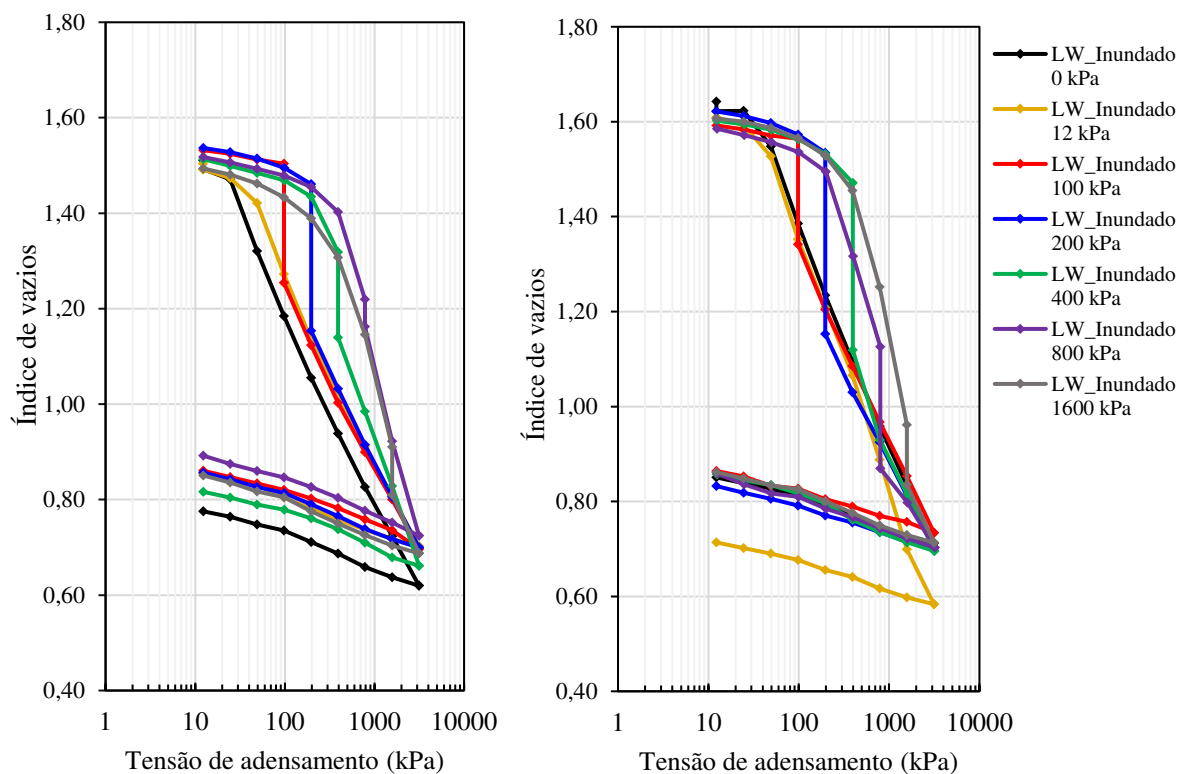


Figura 16: Curvas de compressão de corpos de prova das estruturas LW com diferentes estágios de inundação: (a) solo natural (SN); (b) solo com cimento (SC)

Fonte: (Autoria própria, 2024)

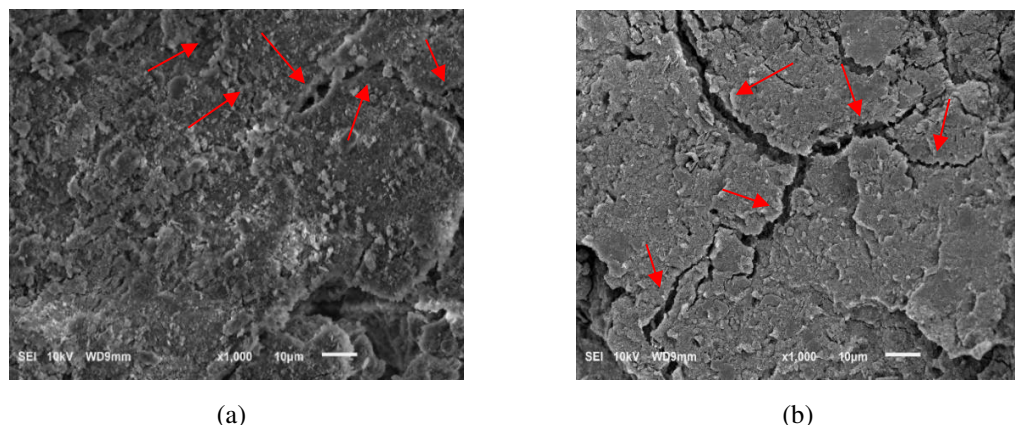


Figura 17: Micrografias das estruturas LW: (a) solo natural x1000; (b) solo com cimento x1000
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da análise micromorfológica das estruturas obtidas por compressão hidrostática (LW), realizada com base nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 17), foi observada a presença de fissuras que podem ser associadas a uma porosidade altamente comunicante (alguns exemplos dessas fissuras são indicados pelas setas inseridas nas figuras de ampliação x1000). Segundo Gutierrez (2005), a ocorrência de uma porosidade intermicroagregada, altamente comunicante, é uma das características de uma microestrutura que seja favorável ao mecanismo do colapso.

Além disso, a partir das imagens obtidas pelo MEV, ainda é possível perceber uma diferenciação na estrutura do solo produzida pela presença do cimento CPV-ARI, sendo possível observar, na imagem referente à estrutura de solo com cimentação artificial (Figura 17b), uma fissuração mais intensa, que pode representar uma interligação entre poros maiores, comparativamente a uma leve fissuração observada na imagem referente à estrutura com solo natural (Figura 17a). Essa presença mais significativa de poros grandes e interconectados pode estar associada a um maior potencial de colapso apresentado pelas estruturas de solo com cimentação artificial, tendo esse potencial se mostrado dependente do nível de tensão atuante, pois, segundo Gutierrez (2005), altos potenciais de colapso deveriam estar associados à presença de poros relativamente grandes.

No que se refere aos resultados apresentados na Figura 16, é possível constatar a ocorrência significativa de colapso em todas as condições testadas, com exceção para as inundações nas tensões de 0 kPa e 12 kPa, indicando a influência do carregamento na susceptibilidade dessa estrutura ao colapso.

Os resultados obtidos para cálculo do potencial de colapso (PC), considerando a metodologia da D 5333 (ASTM, 2003), são apresentados na Figura 18.

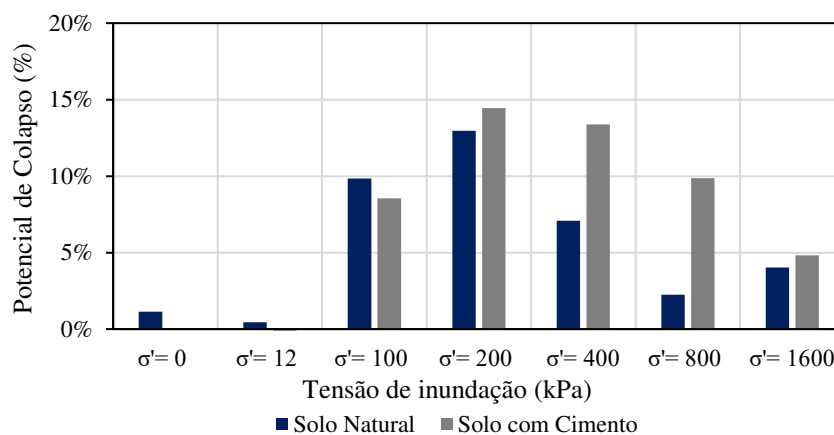


Figura 18: Potencial de colapso de acordo com D 5333 (ASTM, 2003)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

A partir dos dados expostos na Figura 18, percebe-se que o PC para o solo adotado se mostrou dependente da presença ou não de cimentação artificial e da tensão atuante. Além disso, considerando que os corpos de prova com cimentação artificial e os de solo natural foram moldados com índices de vazios distintos, também é possível considerar a influência desse parâmetro no PC do solo. Tais observações estão de acordo com as constatações de Silveira e Rodrigues (2020) de que as deformações oriundas do colapso são dependentes do teor de umidade ou sucção antes da inundação do solo, da tensão de inundação e do grau de compactação.

No que se refere às diferenças entre os PC das estruturas de solo natural e solo com cimento, além do fato de apresentarem índices de vazios iniciais distintos, a cimentação artificial é um fator que altera esse potencial, pois a cimentação e o tipo e grau da ligação entre as partículas são fatores que afetam diretamente o comportamento colapsível dos solos (Jefferson; Smalley, 1995; Mansour; Chik; Taha, 2008; Rezaei; Ajalloeian; Ghafoori, 2012). Esta constatação também é apresentada por Shanz e Karim (2018) que afirmam que o potencial de colapso é associado com a destruição da cimentação entre as partículas de solo quando expostas à inundação e ao carregamento.

Os resultados (Figura 18) indicaram que, para menores níveis de tensão (0 e 12 kPa), o potencial de colapso foi desprezível, conforme previamente apontado pela análise das baixas variações de índice de vazios. Estes resultados são coerentes, uma vez que não são esperadas deformações por colapso para tensões de inundação inferiores à tensão de pré-adensamento do solo saturado. A deformação por colapso do solo é um tipo de deformação plástica (irreversível) e ambas as deformações associadas ao trecho de recompressão do solo saturado e não saturado são elásticas (reversíveis) até a tensão de pré-adensamento do solo saturado. A inundação para a tensão de 100 kPa indicou um potencial de colapso maior para os corpos de prova de solo

natural, que apresentam um menor índice de vazios que os corpos de prova de solo com cimento.

Para os demais níveis de tensão testados (200, 400, 800 e 1600 kPa), o comportamento observado foi contrário (Figura 18), tendo-se maior potencial de colapso para os corpos de prova com cimento, que apresentaram maior índice de vazios inicial que os corpos de prova de solo natural. Tais resultados sugerem uma influência associada entre o nível de tensão atuante e o índice de vazios no potencial de colapso, se considerada a metodologia da D5333 (ASTM, 2003) e de Jennings e Knight (1975) para o cálculo do parâmetro.

Ao considerar-se os aspectos químicos e micromorfológicos para a análise da dependência do potencial de colapso em relação ao nível de tensão atuante, é possível estimar que, para os menores níveis de tensão, a ligação entre as partículas promovida pelo agente cimentante químico (cimento CPV-ARI) se mostrou capaz de reduzir o potencial de colapso de uma microestrutura de porosidade altamente comunicante mais expressiva (Figura 17b). Já para maiores níveis de tensão, as ligações geradas pelo cimento não demonstram resistência frente a ação de tensões mais elevadas, sendo possível considerar-se a ocorrência de um aspecto ligado ao colapso, apontado por Lawton, Fragaszy e Hetherington (1992), que é a ruptura por cisalhamento das ligações devida ao colapso apresentado pela estrutura. Tal fato, associado com a constatação de que a microestrutura do solo com cimento (Figura 17b) apresentou uma porosidade comunicante mais expressiva que a do solo sem cimento (Figura 17a), constitui uma possível explicação para o maior potencial de colapso para as estruturas com cimento, de forma que o colapso resultou em um rearranjo de grãos devido à quebra da cimentação entre as partículas e a uma redução da macroporosidade da estrutura.

Nessa linha, também é possível inferir que o solo com cimento apresentou uma maior capacidade de suporte frente às tensões aplicadas, na condição não saturada, comparativamente ao solo natural, de forma que, sob a atuação de tensões entre 200 kPa e 1600 kPa, a sucção e a cimentação artificial, de modo combinado, garantiram uma maior rigidez para a estrutura. Assim, ao sofrer inundação, a sucção e as ligações cimentícias (ou parte delas) teriam sido eliminadas, o que gerou uma queda de rigidez mais expressiva, resultando em colapsos maiores.

É válido ressaltar que o nível de tensão de inundação em que o solo apresentou maior potencial de colapso, para todas as condições testadas, foi 200 kPa, sendo esta a tensão padrão de referência adotada por Jennings e Knight (1975) e a referenciada na D5333 (ASTM, 2003) para o cálculo do índice de colapso, tendo-se um aumento do PC até 200 kPa e uma redução gradativa após essa tensão. A provável razão para tal comportamento está associada ao índice de vazios do corpo de prova para cada condição de tensão de inundação: até a tensão de 200

kPa, as reduções no índice de vazios foram menores, estando no regime de deformações elásticas; já para os níveis de tensão mais elevados, o acúmulo de deformações permanentes e as reduções mais expressivas nos índices de vazios devidos aos maiores carregamentos culminaram em menores variações de volume devidas à inundação.

Considerando os valores de potencial de colapso encontrados para os ensaios inundados na tensão de 200 kPa (Figura 18), de acordo com a tabela de classificação de colapsibilidade nas obras de engenharia de Jennings e Knight (1975), a gravidade do problema é classificada como grave ($10\% < PC < 20\%$). Segundo a classificação da ASTM (2003), o potencial de colapso obtido para a tensão de inundação de 200 kPa também é dado como grave ($PC > 10\%$). Ainda, de acordo com a classificação proposta por Lutenegger e Saber (1988), a gravidade do problema do PC para a tensão de 200 kPa é classificada como alta, análise condizente com o que foi encontrado através do método de Jennings e Knight (1975) e com a classificação da D 5333 (ASTM, 2003).

A consideração de Vargas (1978), que adota como colapsíveis os solos que apresentam potencial de colapso igual ou maior que 2%, independente da tensão vertical em que se realizou a inundação, não pode ser utilizada como critério para a classificação do solo avaliado na presente pesquisa. Pelos resultados obtidos (Figura 18), observou-se que o potencial de colapso variou em função do nível de tensão de inundação, apresentando valores inferiores a 2% para algumas tensões testadas (0 e 12 kPa) e valores superiores a 2% para outros níveis (100, 200, 400, 800 e 1600 kPa).

3.4. Ensaio de pulso ultrassônico

Para subsidiar a compreensão das diferenças de efeito produzido pela adição do percentual de 2% de cimento CPV-ARI nas estruturas obtidas a partir das técnicas de reconstituição por compressão hidrostática com umidade abaixo da ótima (LW), compressão edométrica com umidade acima da ótima (HW) e na umidade ótima (OW), foram realizados ensaios de pulso ultrassônico. Para tal, foram considerados diferentes tempos de cura e medidos os valores de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) para cada condição.

Os resultados dos ensaios de pulso ultrassônico, realizados para a investigação das possíveis variações no desenvolvimento da cimentação para as três condições de moldagem dos corpos de prova estudados (OW, LW e HW), são apresentados na Figura 19.

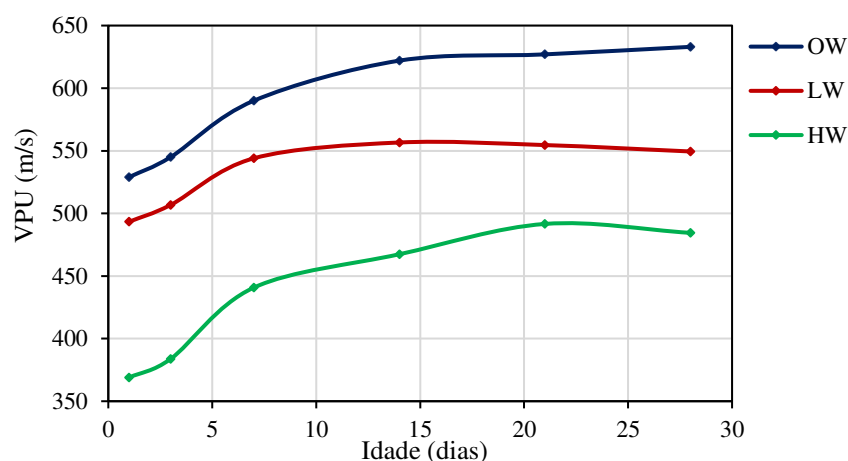


Figura 19: Variação da VPU para as três condições de moldagem
Fonte: (Autoria própria, 2024)

A partir da análise da Figura 19, é possível perceber claramente a variação dos valores da VPU para as diferentes estruturas avaliadas para todos os tempos de cura investigados. Foram observados ganhos expressivos nas idades iniciais e uma tendência de estabilização após os 7 dias de cura, comportamento já esperado para todas as estruturas por ter sido utilizado um cimento CPV-ARI.

Outros autores, como Luong, Destain e Mercatoris (2014) e Chen, Wang e Yao (2016), observaram que alterações na micromorfologia interferem na forma como é dada a propagação do pulso ultrassônico, influenciando na sua absorção e espalhamento. Conforme previamente identificado, os resultados de MEV (Figura 11) indicaram variações microestruturais entre as estruturas OW, LW e HW. Tal observação converge com o conceito da física de que a velocidade de uma onda é diferente de acordo com o meio de propagação. Tem-se que a variação microestrutural no caminho de propagação da onda e as diferenças de organização do meio trifásico do solo em cada estrutura resultaram em variações na VPU.

Um fator que é distinto para cada uma das estruturas é o teor de umidade, sendo este um fator constatado por outros autores como parâmetro que pode causar interferência na VPU (Abdullah *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2013; Kolay; Baser, 2014). Entretanto, a forma como é dada essa interferência, e se ela ocorre, é variável entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores. Sarro e Ferreira (2016) constataram um aumento da VPU com a redução da umidade. Já Assis *et al.* (2018) observaram uma não interferência do teor de umidade na VPU, identificando as alterações na microestrutura devidas às alterações na granulometria como fatores influenciadores, considerando os resultados obtidos em sua pesquisa.

Considerando os aspectos descritos nos parágrafos anteriores, é possível interpretar que os resultados da presente pesquisa apresentaram uma influência do teor de umidade de forma

associada com a estrutura do corpo de prova. Foi observada uma redução da VPU com o aumento do teor de umidade, quando comparados os resultados da estrutura HW (estrutura com menores valores de VPU e maior teor de umidade) com os resultados de LW e OW. Mas, ao serem comparados os resultados de LW e OW, observa-se que a estrutura OW, apesar de apresentar um maior teor de umidade que LW, apresentou os maiores valores de VPU, podendo-se inferir que a explicação de tal resultado esteja na microestrutura e nas distintas variações geradas pela cimentação artificial para cada estrutura avaliada.

Outro aspecto interessante de ser ressaltado é a existência de um limite na quantidade de água presente na amostra, o qual, quando ultrapassado, gera interferência nos resultados da VPU. Vinoth *et al.* (2018) afirmam que a VPU depende do grau de saturação. Segundo Hatanaka e Masuda (2008) e Leong e Cheng (2016), uma variação significativa na velocidade de pulso ultrassônico de ondas longitudinais em um meio poroso ocorre somente quando o grau de saturação varia de 80% a 100%. Dessa forma, uma elevada interferência da presença de água nos vazios nos resultados de VPU é esperada para as estruturas HW_SC ($S_r = 100\%$) e não é esperada para as estruturas LW_SC ($S_r \cong 51,60\%$) e OW_SC ($S_r \cong 56,90\%$), se considerada a constatação da dependência do grau de saturação segundo as literaturas técnicas citadas.

Krautkraemer e Krautkraemer (1990) afirmam que a VPU em um material é fortemente afetada pela sua rigidez. Segundo Consoli *et al.* (2007), alterações de resistência e rigidez decorrentes do efeito da cimentação artificial nos solos são provavelmente relacionadas às estruturas criadas durante os processos de moldagem, enfatizando que a quantidade de água adicionada apresenta um papel fundamental na formação dessas estruturas. Dessa forma, considera-se que a estrutura OW, por possuir uma maior umidade, apresentou uma maior quantidade de água para a hidratação do cimento, o que resultou em uma diferença de formação de microestruturas resultantes da cimentação comparativamente à estrutura LW, que apresentou uma menor quantidade de água durante o processo de formação dessas estruturas. Tais variações, como interferem na rigidez promovida pela cimentação artificial, influenciaram na VPU.

Avaliando-se especificamente as variações nos valores de velocidade, Ye *et al.* (2004) afirmam que um aumento de elementos sólidos conectados permite que o pulso ultrassônico se propague de forma mais rápida através de mais ligações de volumes sólidos e que fatores, como bolhas de ar, causam reflexo da onda ultrassônica e fazem com que seja fortemente atenuada. Na Figura 20, são apresentados os resultados de MEV das estruturas HW, LW e OW com adição de cimento.

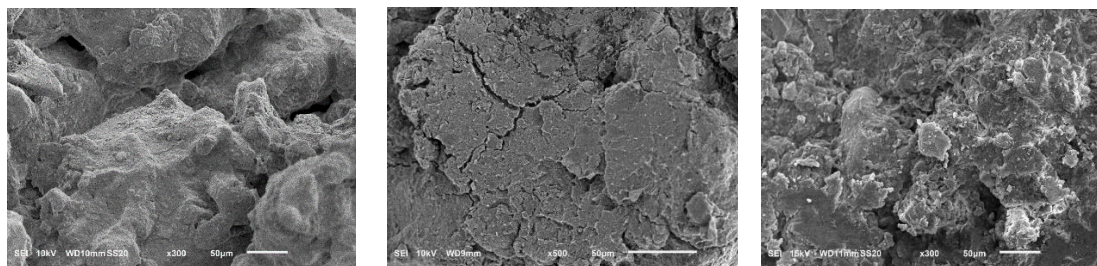


Figura 20: Micrografias das estruturas obtidas com aproximação x300: (a)HW_SC; (b) LW_SC; (c) OW_SC
Fonte: (Autoria própria, 2024)

As imagens reforçam a constatação já apresentada de uma diferença de caminhos para a propagação da onda em cada estrutura. A forma como tais diferenças influenciaram nos valores da VPU pode ser explicada com base nas variações micromorfológicas identificadas na Figura 20, associadas às constatações de Ye *et al.* (2004) previamente citadas.

Para a estrutura HW (Figura 20a), uma estrutura homogênea, com uma maior orientação das partículas, tem-se uma condição de presença de poros saturados e de grumos mais deformáveis, sendo observadas condições que resultaram em menores velocidades de propagação da onda, provavelmente ligadas à menor rigidez do meio sólido, mesmo com a presença da cimentação artificial, e interconexões menos expressivas do que as observadas em estruturas flocluladas.

A estrutura LW (Figura 20b), por apresentar o menor teor de umidade, sendo, portanto, possível estimar que ela apresente uma maior quantidade de bolhas de ar, atrelado ao fato de a estrutura apresentar uma porosidade comunicante (conforme discutido nas análises de colapso, estrutura metaestável), proporcionou um caminho para propagação da onda ultrassônica de menor velocidade do que o criado pela estrutura OW devido aos reflexos causados pelas bolhas de ar que atenuaram a velocidade.

A estrutura OW (Figura 20c), por outro lado, por apresentar uma microestrutura que sugere um maior contato entre as partículas, gerado pelo esforço de compactação e pelas ligações produzidas pela cimentação artificial, proporcionou caminhos com conexões mais expressivas do meio sólido, que resultou em maiores velocidades de propagação da onda.

3.5. Curva de retenção de água

Na Figura 21, são apresentados os resultados obtidos através das técnicas de mesa de sucção, câmara de Richards e papel filtro, compilados de forma conjunta para a determinação da curva de retenção de água, para as seis estruturas avaliadas. Na Figura 22 (a seguir), são

apresentadas as curvas de retenção obtidas através da aplicação de modelos de ajuste, considerando os dados experimentais apresentados na Figura 21.

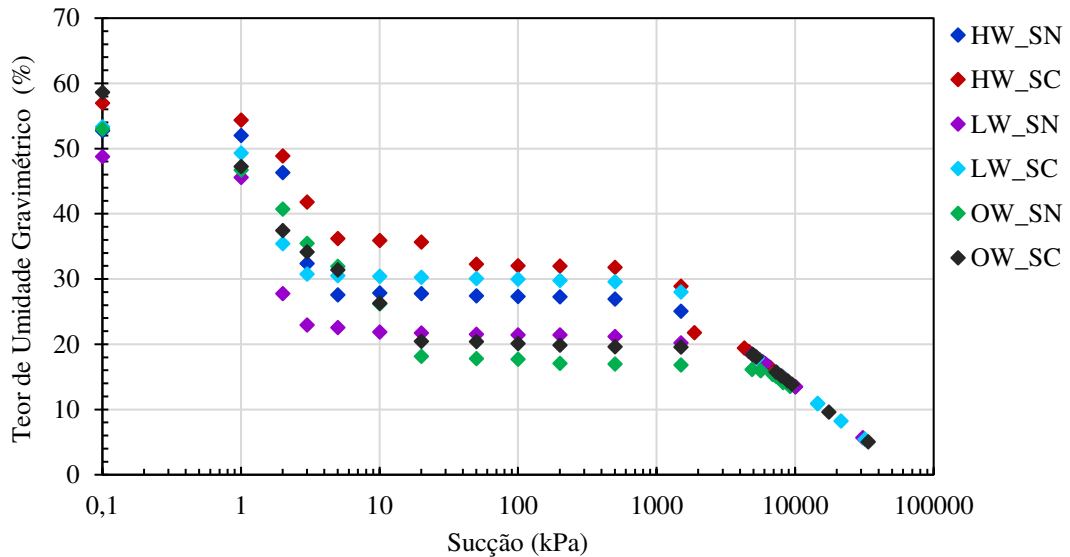


Figura 21: Resultados dos ensaios realizados para a obtenção das curvas de retenção de água
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os resultados indicaram comportamento bimodal, com dois valores de entrada de ar e um patamar intermediário bem definido para as estruturas produzidas com as três condições de umidade e as diferentes técnicas de reconstituição de corpos de prova investigadas (LW, OW, HW), nas condições de solo natural (SN) e solo com cimentação artificial (SC). Sousa *et al.* (2021) afirmam que o formato bimodal da curva de retenção de água é uma das características peculiares dos solos tropicais.

Neste contexto, é possível observar que as variações geradas a níveis macro e microestrutural, conforme já discutido a partir dos resultados de MEV e edométrico, alinhadas às alterações químicas pela presença da cimentação artificial que influenciaram nas propriedades geotécnicas, não interferiam neste comportamento típico do solo, considerando-se que foi mantido o formato bimodal da curva de retenção. Este resultado converge com o que foi observado através do MEV, cujas imagens indicaram o comportamento bimodal das estruturas através da presença de agregações de partículas resultando na formação de macroporos e microporos.

Entretanto, apesar de ser mantido o formato bimodal, a variação da estrutura devida à técnica de reconstituição, teor de umidade de moldagem e presença ou não da cimentação artificial produziu variações que claramente influenciaram na curva de retenção, conforme é possível observar na Figura 21 através das variações entre as seis curvas investigadas.

É válido ressaltar que tais variações são observadas para menores níveis de sucção, estando abaixo da segunda entrada de ar (ψ_2) ou sucção residual. Para níveis mais elevados de sucção, acima da sucção residual, uma clara tendência de sobreposição das curvas foi constatada. Tal comportamento também foi observado por diversos outros autores (Carvalho *et al.*, 2015; Heidemann *et al.*, 2016; Doung *et al.*, 2016; Neto *et al.*, 2018).

Sousa *et al.* (2021) afirmam que, na macroestrutura, a compactação influencia diretamente o comportamento de solos tropicais finos lateríticos e não saturados. Já na zona da microestrutura, os autores afirmam que o impacto é muito menor e as curvas mal se distinguem. Assim, é possível inferir que as técnicas de moldagem influenciaram a nível de macroporos e que, a nível de microporos, a influência pode ser desconsiderada. Essa observação também foi constatada por outros autores que afirmaram que, independentemente da técnica empregada para moldagem de corpos de prova, a macroporosidade é alterada pelo processo de compactação, enquanto a microporosidade permanece constante (Romero; Vaunat, 2000; Benatti; Miguel, 2013; Borges, 2014; Otalvaro *et al.*, 2015).

Avaliando-se o efeito da variação da estrutura com base nos resultados dos ensaios, observa-se que, a nível de macroporos, a estrutura influencia diretamente na relação entre a sucção e o teor de umidade. Na Figura 21, pode-se observar que, para um mesmo teor de umidade, a estrutura HW apresentou maiores valores de sucção que as estruturas LW e OW. Considerando um comparativo entre LW e OW, é observado que essa relação varia em alguns pontos da curva, não havendo um padrão comportamental quanto a qual estrutura apresenta maior ou menor valor de sucção, para um mesmo teor de umidade, em relação à outra estrutura.

A provável explicação para esses maiores valores de sucção para a estrutura HW está ligada ao processo de reconstituição a partir de um estado de lama utilizado para essa estrutura. Conforme observado através dos resultados do MEV (Figura 11), esse processo promoveu uma reestruturação do solo que resultou em uma estrutura mais homogênea que as demais avaliadas, com as partículas mais orientadas e com um maior grau de acomodação das agregações de partículas e com redução do tamanho dos poros. Segundo autores como Romero *et al.* (2011), Han e Vanapalli (2016) e Oliveira *et al.* (2021), como decorrência direta da reconstituição no teor de umidade de saturação, tem-se a diminuição dos poros da estrutura HW e o conseqüente aumento da sucção, quando comparada às estruturas OW e LW.

A Tabela 8 apresenta os valores da primeira entrada de ar (ψ_1) e da segunda entrada de ar (ψ_2), tendo por base os resultados experimentais das curvas bimodais apresentadas na Figura 21, considerando todas as estruturas avaliadas.

Tabela 8: Valores de entrada de ar das diferentes estruturas avaliadas

Identificação da estrutura	Valor de entrada de ar ψ_1 (kPa)	Valor de entrada de ar ψ_2 (kPa)
LW_SN	1,23	1400
OW_SN	1,43	1580
HW_SN	1,80	1033
LW_SC	1,20	1037
OW_SC	1,27	1450
HW_SC	1,50	1027

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os dados experimentais indicaram, para todas as estruturas estudadas, baixos valores para a primeira entrada de ar (ψ_1) da curva bimodal, não sendo tais valores típicos de solos de textura argilosa de elevada capacidade de retenção de água e sendo mais similares a resultados de solos arenosos. Segundo o padrão das curvas típicas proposto por Fredlund e Xing (1994), são esperados valores elevados de entrada de ar para solos argilosos. Esses resultados baixos são indicativos da existência de formação de agregações de partículas (grumos de argilominerais) que, em função da presença da sucção, podem se comportar como grãos de areia (Sivakumar; Wheeler, 2000; Oliveira; Marinho, 2004; Benatti *et al.*, 2013).

Além da corroboração desses resultados tendo por base outros pesquisadores, os resultados dos ensaios de granulometria conjunta sem o uso de defloculante (Figura 10) e de microscopia (Figura 11) também indicaram a presença de agregações no solo argiloso estudado neste trabalho. Assim, conforme constatado por Oliveira *et al.* (2018), para baixos valores de sucção, foi observado um comportamento típico de solo arenoso, sendo as estruturas marcadas por macroporos localizados entre as agregações e tal condição governando a dessaturação inicial.

Analisando-se de forma comparativa, os valores de ψ_1 e ψ_2 das estruturas de solo natural são levemente superiores aos valores desses parâmetros para estruturas com presença da cimentação artificial. Tais resultados podem ser explicados pelo fato de que a adição de cimento promoveu o deslocamento da curva granulométrica para o lado mais grosseiro, tendo-se maior percentual de partículas de tamanho areia e menor percentual de tamanho argila, comparativamente ao solo natural. Dessa forma, a dessaturação inicial das estruturas com cimento se deu a um menor valor de sucção.

Os resultados obtidos através da inserção dos dados experimentais no software *SWRC Fit* são apresentados nas Tabelas 9 e 10. Na Tabela 9, são apresentados os valores de R^2 e AIC

para cada modelo de ajuste testado, visando a seleção do modelo mais adequado para os dados experimentais desta pesquisa. No que se refere à Tabela 10, são apresentados os parâmetros dos modelos que apresentaram os melhores ajustes para os dados avaliados, considerando como premissa a seleção de modelos bimodais devido ao comportamento observado para este solo sem o uso de ajustes, ou seja, a partir dos dados experimentais (Figura 21).

Tabela 9: Valores de R^2 e AIC obtidos para cada modelo aplicado nos dados através do *SWRC Fit*

Identificação da Estrutura	Modelo testado no <i>SWRC Fit</i>	Solo Natural (SN)		Solo Cimento (SC)	
		R^2	AIC	R^2	AIC
LW	Brooks e Corey	0,8525	-123,58	0,8408	-112,27
	van Genuchten	0,8384	-121,75	0,8401	-112,19
	Kosugi	0,8326	-121,04	0,8658	-115,69
	Fredlund e Xing	0,9052	-130,42	0,8788	-115,72
	Bimodal- Brooks e Corey (dual-BC)	0,9968	-195,89	0,9933	-171,54
	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	0,9990	-219,47	0,9990	-209,13
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	0,9986	-212,87	0,9986	-202,82
OW	Brooks e Corey	0,9601	-131,62	0,9437	-132,60
	van Genuchten	0,9625	-133,80	0,9412	131,73
	Kosugi	0,9585	-131,88	0,9261	-127,16
	Fredlund e Xing	0,9662	-133,81	0,9520	-133,79
	Bimodal- Brooks e Corey (dual-BC)	0,9869	-149,82	0,9951	-177,46
	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	0,9704	-134,34	0,9585	-134,67
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	0,9966	-175,63	0,9963	-182,87
HW	Brooks e Corey	0,8792	-95,78	0,9323	-128,84
	van Genuchten	0,8647	-93,95	0,9295	-128,03
	Kosugi	0,8616	-93,59	0,9282	-127,67
	Fredlund e Xing	0,9249	-101,37	0,9264	-125,16
	Bimodal- Brooks e Corey (dual-BC)	0,9875	-128,02	0,9891	-161,40
	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	0,9997	-190,14	0,9911	-165,41
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	0,9997	-189,01	0,9904	-164,00

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Tabela 10: Parâmetros dos modelos com melhores correlações com os dados experimentais

Identificação da Estrutura	Modelo testado no <i>SWRC Fit</i>	Parâmetros do modelo avaliado	R ²	AIC
LW_SN	Bimodal- van Genuchten (dual -VG)	$\theta_s=0,48819 / w_1=0,55893/$ $\alpha_1=0,07029 / n_1=4,9143/$ $\alpha_2=1,2982e-05 / n_2=1,9308$	0,9990	-219,47
	Bimodal – Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,48838 / w_1=0,55708/$ $hm_1=15,272 / \sigma_1=0,36667/$ $hm_2=1,4662e+05 / \sigma_2=1,1479$	0,9986	-212,87
LW_SC	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	$\theta_s=0,53244 / w_1=0,43400/$ $\alpha_1=0,074423 / n_1=4,5697/$ $\alpha_2=3,1294e-05 / n_2=1,6838$	0,9990	-209,13
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,53286/ w_1=0,43169/$ $hm_1=14,628/ \sigma_1=0,39875/$ $hm_2=8,1511e+04 / \sigma_2=1,4767$	0,9986	-202,82
OW_SN	Bimodal- van Genuchten (dual -VG)	$\theta_s=0,52974 / w_1=0,53517/$ $\alpha_1=2,8889 / n_1=1,059/$ $\alpha_2=0,040121 / n_2=2,2502$	0,9704	-134,34
	Bimodal – Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,52903 / w_1=0,67999/$ $hm_1=34,819 / \sigma_1=1,3331/$ $hm_2=2,071e+05 / \sigma_2=0,89465$	0,9966	-175,63
OW_SC	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	$\theta_s=0,58645 / w_1=0,60781/$ $\alpha_1=0,76821 / n_1=1,0834/$ $\alpha_2=0,083682 / n_2=2,316$	0,9585	-134,67
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,58754 / w_1=0,66333/$ $hm_1=19,599 / \sigma_1=1,4843 /$ $hm_2=1,6806e+05 / \sigma_2=0,98237$	0,9963	-182,87
HW_SN	Bimodal- van Genuchten (dual -VG)	$\theta_s=0,52410 / w_1=0,47531/$ $\alpha_1=0,043441 / n_1=6,6799/$ $\alpha_2=3,0583e-05 / n_2=1,5874$	0,9997	-190,14
	Bimodal – Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,52375 / w_1=0,47465/$ $hm_1=23,973 / \sigma_1=0,2612/$ $hm_2=9,1365e+04 / \sigma_2=1,3612$	0,9997	-189,01
HW_SC	Bimodal- van Genuchten (dual-VG)	$\theta_s=0,56718 / w_1=0,40983/$ $\alpha_1=0,050392 / n_1=2,9432/$ $\alpha_2=7,9773e-05 / n_2=1,4144$	0,9911	-165,41
	Bimodal- Kosugi (dual-KO)	$\theta_s=0,56575 / w_1=0,39615/$ $hm_1=24,139 / \sigma_1=0,5914 /$ $hm_2=5,9793+04 / \sigma_2=1,9561$	0,9904	-164,00

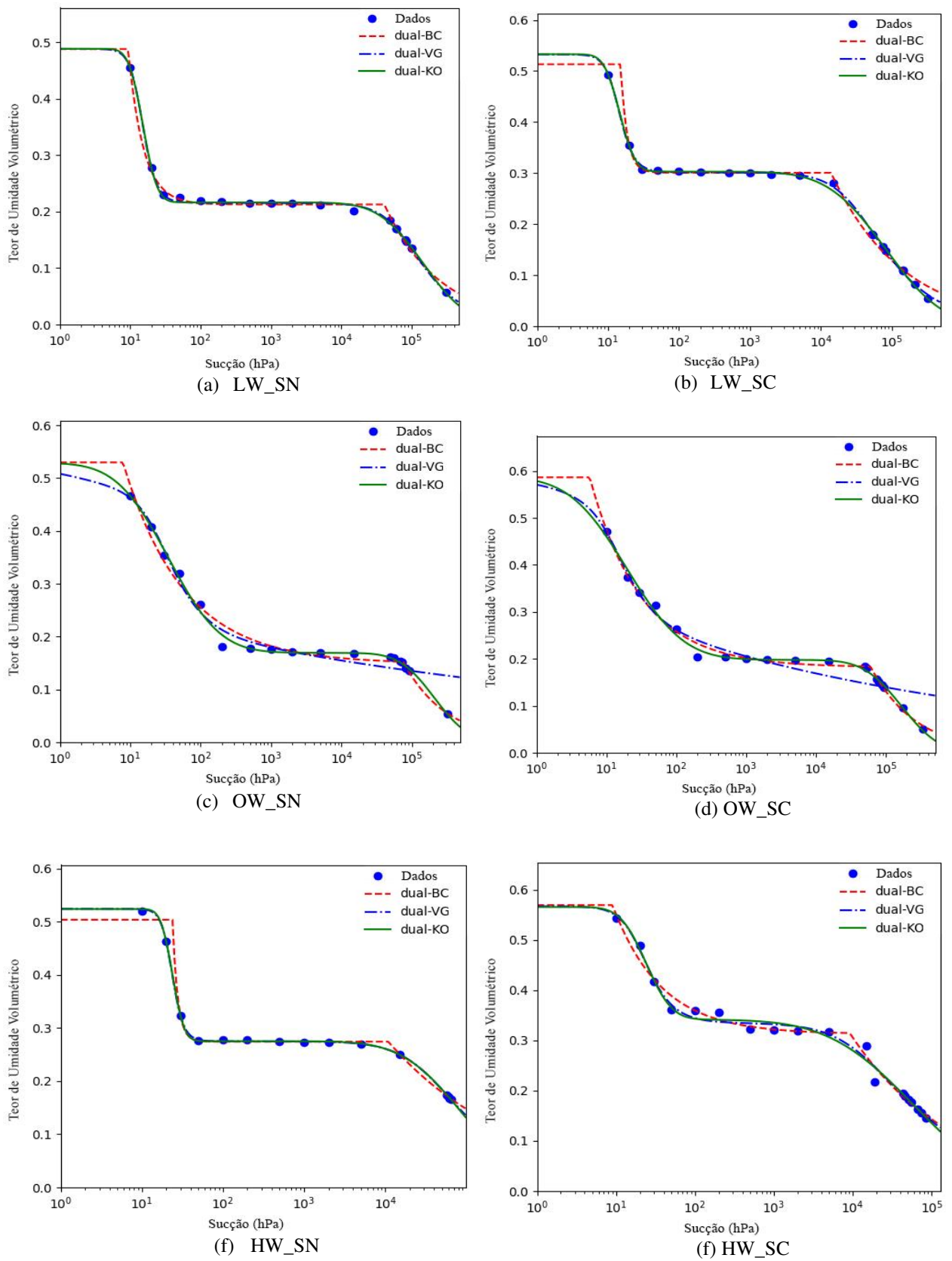


Figura 22: Curvas de retenção de água obtidas pela aplicação dos modelos dual-BC, dual-VG, dual-KO: (a) LW_SN; (b) LW_SC; (c) OW_SN; (d) OW_SC; (e) HW_SN; (f) HW_SC

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando-se a Tabela 9, é possível observar que todos os dados experimentais obtidos foram melhor ajustados pelos modelos multimodais em relação aos unimodais. Tal constatação é observada a partir dos maiores valores de R^2 e menores valores de AIC apresentados pelos modelos multimodais (dual).

Observando-se as Tabelas 9 e 10 de forma conjunta, percebe-se que o modelo bimodal baseado no modelo de van Genuchten (dual-VG) apresentou melhor ajuste para os dados experimentais obtidos dos corpos de prova das estruturas LW e HW, enquanto o modelo bimodal de Kosugi (dual-KO) apresentou melhor ajuste para os dados experimentais da estrutura OW, tendo estes apresentados maiores valores de R^2 e menores valores de AIC.

É válido ressaltar que a presença da cimentação artificial não indicou necessidade de alteração do modelo que apresentou melhor ajuste, tendo-se, para as estruturas LW, HW e OW, a mesma seleção de modelo, com base nos critérios já citados, para as condições de solo natural e com cimentação artificial (Tabela 10). Comparando-se os valores de R^2 obtidos nos modelos dual-VG e dual-KO, para os resultados dos corpos de prova de solo natural e com cimentação artificial, percebe-se que, independentemente das condições de moldagem (LW, OW e HW), os valores para a condição de solo natural foram maiores. Entretanto, tal diferença de valores se mostrou muito pequena, não permitindo uma constatação de que a condição de solo natural apresentou melhores ajustes pelos modelos testados.

Outro aspecto válido de ser abordado é que, apesar da estrutura OW ter apresentado melhor ajuste para o modelo dual-KO, os resultados (R^2 e AIC) do ajuste de seus dados experimentais pelo modelo dual-VG (Tabela 10) também se mostraram satisfatórios, tanto para a condição de solo natural ($R^2 = 0,9704$) quanto para a condição com cimentação artificial ($R^2 = 0,9585$). A análise contrária também se aplica, na qual os dados das estruturas LW e OW apresentaram ajustes satisfatórios para o modelo dual-KO, conforme pode ser observado pelos valores de R^2 obtidos (Tabela 10).

Isto indica que a aplicação do modelo dual-VG também se mostra adequada para a estrutura OW, assim como LW e HW para o modelo dual-KO, o que permite inferir que, para os dados experimentais de todas as estruturas investigadas, os modelos dual-VG e dual-KO poderiam ser satisfatoriamente aplicados. Nessa linha, para fins comparativos dos efeitos da variação da estrutura nos parâmetros dos modelos de ajuste da curva de retenção, seria passível eliminar o uso de diferentes modelos de ajuste como uma variável presente na comparação.

3.6. Análise do efeito de ciclos de umedecimento e secagem através dos ensaios CRS e pulso ultrassônico

Nas Figuras 23 e 24, são apresentados os resultados, para os corpos de prova de estruturas LW e OW, respectivamente, do ensaio de adensamento CRS na forma de curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva, para os corpos de prova de solo natural (SN) e com adição de cimentação artificial (SC), considerando-se as condições após secagem do corpo de prova, após umedecimento e secagem do corpo de prova e com as condições de moldagem preservadas.

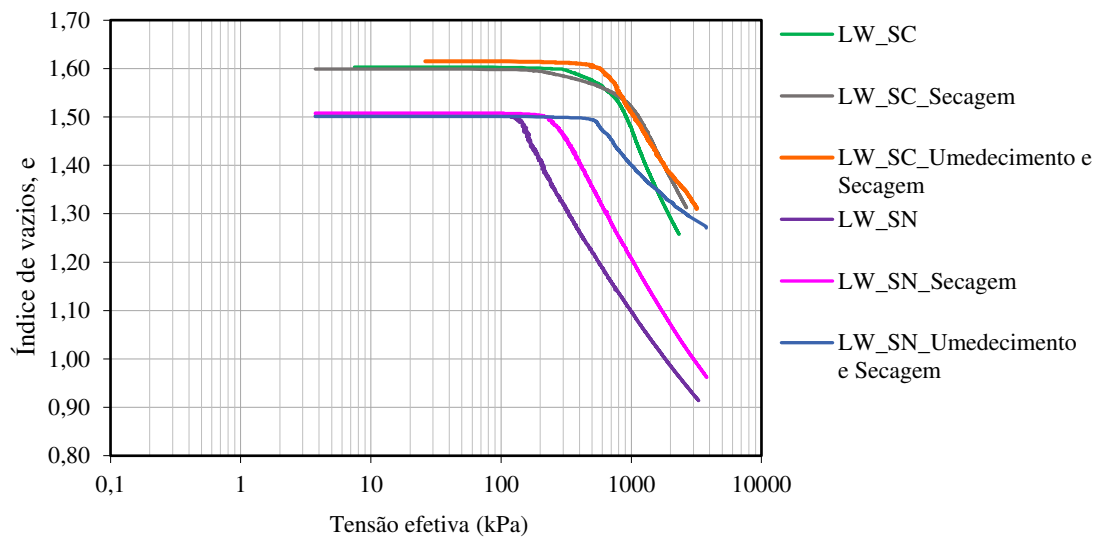


Figura 23: Curvas de adensamento da estrutura obtida com umidade abaixo da ótima (LW)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

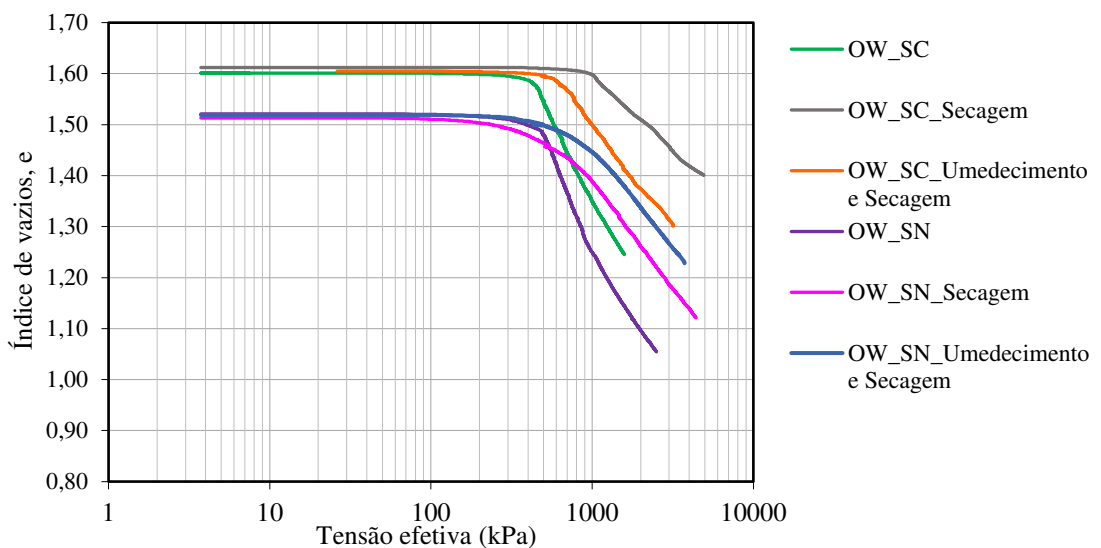


Figura 24: Curvas de adensamento da estrutura obtida na umidade ótima (HW)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando o comportamento das curvas LW_SN (Figura 23), é possível perceber que, independentemente da condição investigada, ocorre uma mudança brusca na curva índice de vazios *versus* log da tensão efetiva vertical, enquanto que, para as curvas LW_SC, foram obtidas curvas mais suaves que são indicativas de uma característica de compressão progressiva dos corpos de prova desde o início do ensaio. Tal diferença comportamental permite supor que a presença da cimentação artificial nas estruturas LW influenciou de forma a promover uma maior rigidez ao solo sob menores tensões, uma vez que houve um deslocamento das curvas das amostras LW_SC para a direita, além dos níveis de deformações dessas amostras terem sido inferiores aos das amostras LW_SN.

É interessante observar que essa influência da cimentação artificial se mostrou restrita às estruturas LW, sendo que, para estruturas OW (Figura 24), tal comportamento não foi observado. As estruturas OW_SC apresentaram, para todas as condições investigadas, mudanças bruscas no gradiente da curva e ausência da definição de um patamar de deformações elásticas. Nos corpos de prova OW_SN, o mesmo comportamento de mudança brusca de gradiente foi observado para a curva obtida a partir do ensaio realizado no corpo de prova cujas condições de moldagem foram preservadas para realização do ensaio CRS. Para os corpos de prova submetidos aos processos de secagem e ciclagem, foi indicada uma possível suavização na transição do domínio de menores deformações para grandes deformações (deformações plásticas).

No que se refere aos efeitos causados pelos processos de secagem (secagem ao ar por 24 h à temperatura controlada de 25°C) e ciclagem (saturação por capilaridade e aspersão por 24 h seguida de secagem por 48 h à temperatura controlada de 25°C) nas curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva, observa-se que foram distintos para as diferentes estruturas avaliadas.

Nas estruturas de solo natural LW e OW, é possível notar um deslocamento para a direita das curvas devido ao efeito da secagem e da ciclagem, sendo o deslocamento mais acentuado promovido pelo processo de ciclagem. Além disso, é válido ressaltar que esses deslocamentos foram mais expressivos na estrutura LW_SN, o que indica que esta estrutura se mostrou mais suscetível a alterações de rigidez e compressibilidade promovidas pela ação de acréscimo ou redução de água. Entretanto, avaliando-se as demais estruturas investigadas de forma comparativa, percebe-se que as estruturas OW_SN e OW_SC apresentaram maiores incrementos de rigidez com a secagem e ciclagem do que a estrutura LW_SC. Tal fato corrobora com a ideia apresentada de que a cimentação artificial na estrutura LW apresentou uma

influência mais expressiva que na OW, considerando uma capacidade de promover uma maior preservação da estrutura frente à secagem e à ciclagem.

Considerando o efeito de deslocamento das curvas para a direita devido ao efeito da secagem e da ciclagem, este remete a um aumento na tensão de plastificação. Segundo Denardin (2005), uma vez ultrapassado o valor da tensão de cedência, os valores de deformação aumentam significativamente. Nessa linha, é possível identificar o efeito causado no comportamento dos corpos de prova pelos processos de secagem e ciclagem através de dois fatores que podem ser observados a partir das Figuras 23 e 24: o primeiro seria um possível aumento na tensão de cedência (tensão de pré-adensamento ou de plastificação), já citado; e o segundo, uma redução da variação do índice de vazios para um mesmo nível de tensão, observada nos trechos da curva correspondentes à maiores deformações (pós tensão de cedência).

Dessa forma, é possível estimar que o histórico de sucção induzido nesses corpos de prova, que tiveram uma redução do teor de umidade inicial (Tabela 11 a seguir), gerou uma alteração na estrutura que promoveu um incremento de rigidez associado a um aumento da parcela de sucção, mais significativo para menores níveis de tensões. Entretanto, é válido ressaltar que essa observação se baseia em análises do estado dos corpos de prova antes do ensaio CRS, considerando que, para a execução deste ensaio, todos os corpos de prova foram saturados, conforme a metodologia de sua execução.

Os resultados dos ensaios de pulso ultrassônico realizados nos corpos de prova OW e LW, que foram submetidos posteriormente ao ensaio CRS conforme discutido anteriormente, são apresentados na Figura 25.

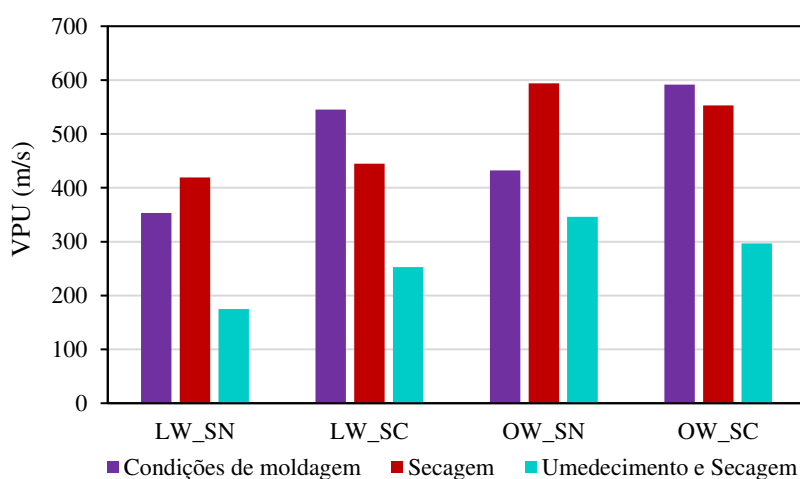


Figura 25: Valores de VPU para os corpos de prova submetidos ao ensaio CRS
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através do gráfico da Figura 25, é possível perceber que a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi influenciada pela secagem e pelos ciclos de umedecimento e secagem em todas as condições de estruturas estudadas. Tal influência é resultado das alterações promovidas por tais processos nos corpos de prova e que resultaram, portanto, em distintos caminhos e condições para propagação da onda.

No que se refere às variações de influência observadas, nota-se que o processo de secagem resultou em uma modificação do caminho de propagação da onda que resultou em valores de VPU mais altos para estruturas de solo natural (LW_SN e OW_SN) e mais baixos para estruturas com cimentação artificial (LW_SC e OW_SC), comparativamente aos valores obtidos para tais estruturas em condição normal. Já para o processo de umedecimento e secagem, os resultados apontaram uma redução dos valores de VPU para todas as estruturas em comparação aos valores de VPU da condição normal.

Para a melhor compreensão de tais variações na VPU, foram avaliados os valores de variação da massa de água em cada etapa dos processos investigados nos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de VPU e CRS. Os corpos de prova foram pesados em quatro condições: após a moldagem (condições de moldagem), após a secagem de 24h (condições de secagem) e, na análise da condição de umedecimento e secagem, após a etapa de saturação por 48 h (condições de umedecimento) e após a secagem de 24 h (condições de umedecimento e secagem). É válido reforçar que os ensaios de pulso ultrassônico foram realizados em cada uma dessas etapas, imediatamente após cada pesagem. Os resultados do percentual de variação de massa de água e da VPU são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Percentuais de variação de massa de água e de VPU

Identificação da Estrutura	Condição avaliada	$\Delta\%$ Massa de água	$\Delta\%$ VPU
LW_SN	Umedecimento	20,20	-
	Secagem	-9,88	18,20
	Umedecimento e Secagem	-0,41	-50,40
LW_SC	Umedecimento	14,55	-
	Secagem	-12,45	-18,50
	Umedecimento e Secagem	-3,11	-53,52
OW_SN	Umedecimento	13,05	-
	Secagem	-9,78	36,35
	Umedecimento e Secagem	-5,20	-19,60
OW_SC	Umedecimento	11,26	-
	Secagem	-8,55	-6,73
	Umedecimento e Secagem	-9,47	-49,62

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Ao se observar os resultados obtidos para a condição identificada como umedecimento, referente à etapa de saturação por 48 h no processo de ciclagem, não são apresentados resultados de variação de VPU. Isso se deve ao fato de que os CPs testados para essa condição, independente da estrutura avaliada, não apresentaram registros de VPU no equipamento do ensaio. Dessa forma, foi possível constatar uma influência da presença de água nos vazios de forma a dificultar a propagação da onda ultrassônica. Tal constatação corrobora com o apresentado por outros autores que afirmam que uma elevação no grau de saturação para valores acima de 80% promove variações na VPU (Hatanaka; Masuda, 2008; Leong; Cheng, 2016), o que indica que a elevação da quantidade de água nas amostras interferiu de forma negativa na propagação do pulso ultrassônico.

Em relação aos percentuais de ganhos de massa de água no umedecimento, os resultados da Tabela 11 apontam que as estruturas LW, tanto na condição de solo natural quanto na de solo com cimentação artificial, apresentaram maior ganho que as estruturas OW. Este resultado pode ser explicado com base no fato de que o teor de umidade de moldagem das estruturas LW é inferior ao teor de umidade de moldagem das estruturas OW. Assim, como ambas as estruturas apresentam o mesmo índice de vazios, a estrutura com menor umidade (LW) necessitará de uma maior quantidade de água para preencher seus vazios. Essa maior suscetibilidade à absorção de água também foi observada visualmente durante a execução dos ensaios, em que a percolação da água por capilaridade se mostrou mais rápida nas estruturas LW, sendo o instante em que a água atinge a face do corpo de prova, oposta à face em contato com a pedra porosa, observado primeiramente nos CPs LW e posteriormente nos OW.

Fazendo-se um comparativo entre as estruturas na condição de solo natural e solo cimento, é possível perceber que as estruturas SN apresentaram um percentual de ganho de massa de água maior que as estruturas SC, provavelmente devido à presença das ligações cimentícias que produzem uma estrutura com maior interconexão entre os meios sólidos e, possivelmente, dificulta a entrada de água. Outro aspecto que pode ser citado é a cristalização dos compostos cimentícios no interior dos vazios, cuja presença reduziu os espaços vazios para a livre circulação da água. Ou seja, a presença da cimentação artificial nas estruturas produziu uma estrutura menos porosa, comparativamente às estruturas de solo natural, e menos suscetível à infiltração da água.

Através da Tabela 11, é possível perceber que o processo de secagem promoveu perda de água em todas as estruturas, tendo as estruturas LW um maior percentual de redução de massa de água do que as OW, entretanto essas diferenças foram em percentuais muito baixos. Uma possível explicação para essa maior perda de água por parte da estrutura LW é o fato de

que as estruturas LW apresentam poros comunicantes, conforme previamente discutido através dos resultados das análises microestruturais (Figura 17) e apontado como um dos fatores que condicionam sua suscetibilidade ao colapso.

Em relação à variação percentual na VPU, observa-se que a secagem provocou um aumento nesse percentual para as estruturas de solo natural (LW_SN e OW_SN) e uma redução para as estruturas de solo com cimento (LW_SC e OW_SC). No caso das estruturas SN, tendo por base os resultados observados na molhagem, cujo acréscimo de água não permitiu registros de VPU, sendo o aumento da saturação considerado como um fator atenuante à propagação da onda, infere-se que a redução de umidade permitiu uma melhor propagação da onda ultrassônica através da estrutura do corpo de prova alterada pela secagem.

Entretanto, é válido ressaltar a particularidade dessa condição e que esta deve ser avaliada de forma conjunta com outros fatores, como, por exemplo, possíveis alterações geradas na microestrutura do corpo de prova com a redução da massa de água, sendo que nem sempre a redução de massa de água implicará de forma direta em acréscimos na VPU. Considerando que a presença de bolhas de ar pode ser um fator atenuante do pulso e redutor da velocidade de propagação ultrassônica (Ye *et al.*, 2004) e que, na secagem, a água perdida nos vazios é substituída pelo ar, um aumento da VPU em uma condição de secagem pode estar associado com a redução de massa água, em conjunto com as alterações produzidas na microestrutura dos corpos de prova.

Outro fator também a ser considerado nessa análise é a presença ou não de cimentação artificial. Através da Tabela 11, percebe-se que o processo de secagem promoveu redução percentual na VPU para as estruturas SC. Assim, é possível inferir que as alterações geradas pela perda de água, como um possível enfraquecimento das ligações cimentícias, devido à redução da quantidade de água disponível para a hidratação do cimento, e o aumento da presença de ar nos corpos de prova LW_SC e OW_SC, resultou em um meio que permitiu a propagação do pulso ultrassônico de forma mais lenta que a condição normal produzida pela moldagem dos corpos de prova.

Essa linha de análise também pode ser aplicada para as condições de ciclos de umedecimento e secagem avaliadas, em que, através da Tabela 11, é novamente observada a redução no percentual de massa de água final e na VPU, de forma que as variações produzidas por esse processo nas estruturas investigadas resultaram em condições de propagação de pulso ultrassônico de forma mais lenta que as condições de moldagem.

3.7. Estudo da ciclagem através do ensaio de adensamento incremental e seus efeitos na suscetibilidade ao colapso

Para o estudo de um possível efeito de ciclos de umedecimento e secagem na suscetibilidade ao colapso, foram testadas diferentes condições (análogas às aplicadas no ensaio CRS), considerando a estrutura identificada neste trabalho como a que apresentou maior suscetibilidade ao colapso, a saber, a estrutura obtida por compressão hidrostática (LW) nas condições de solo natural (SN) e solo com cimento (SC).

As condições avaliadas foram os processos de secagem (secagem ao ar por 24 h à temperatura controlada de 25°C) e umedecimento e secagem (saturação por capilaridade e aspersão por 24 h, seguida de secagem por 48 h à temperatura controlada de 25°C). A tensão selecionada para avaliar a interferência de tais processos na suscetibilidade da estrutura ao colapso foi a tensão de inundação de 200 kPa, por esta ter apresentado o maior potencial de colapso observado nesta pesquisa (Figuras 16 e 18).

Nas Figuras 26 e 27, são apresentadas as curvas índice de vazios *versus* log da tensão vertical efetiva (tensão de adensamento), considerando as condições de testes citadas no parágrafo anterior, a saber, após secagem, após umedecimento e secagem, com condições de moldagem preservadas. Além dessas condições, foram apresentadas as curvas dos ensaios realizados em corpos de prova na condição de moldagem e inundados antes do início dos carregamentos e à tensão de 200 kPa.

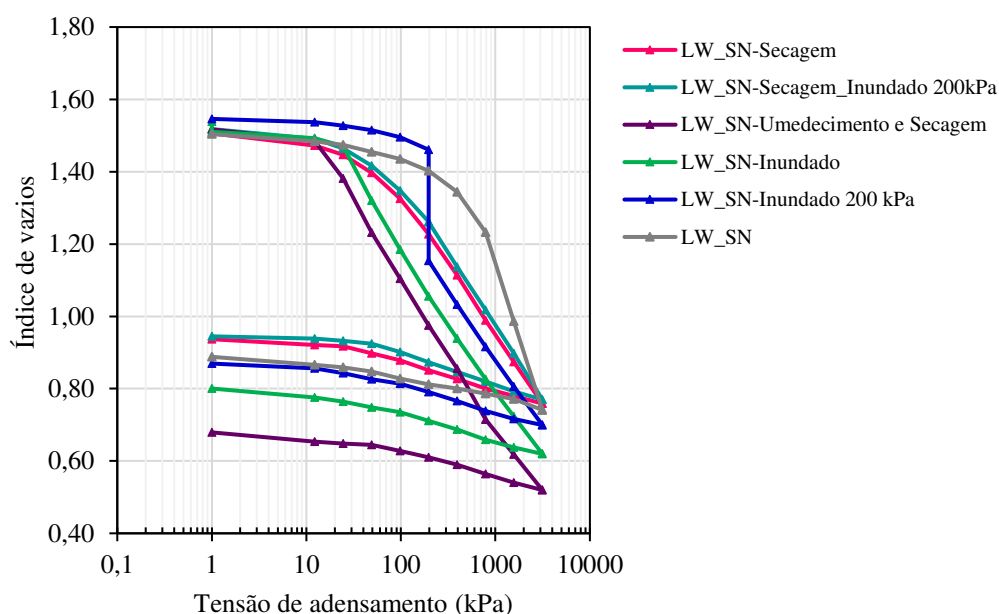


Figura 26: Curvas de compressão das estruturas LW_SN
Fonte: (Autoria própria, 2024)

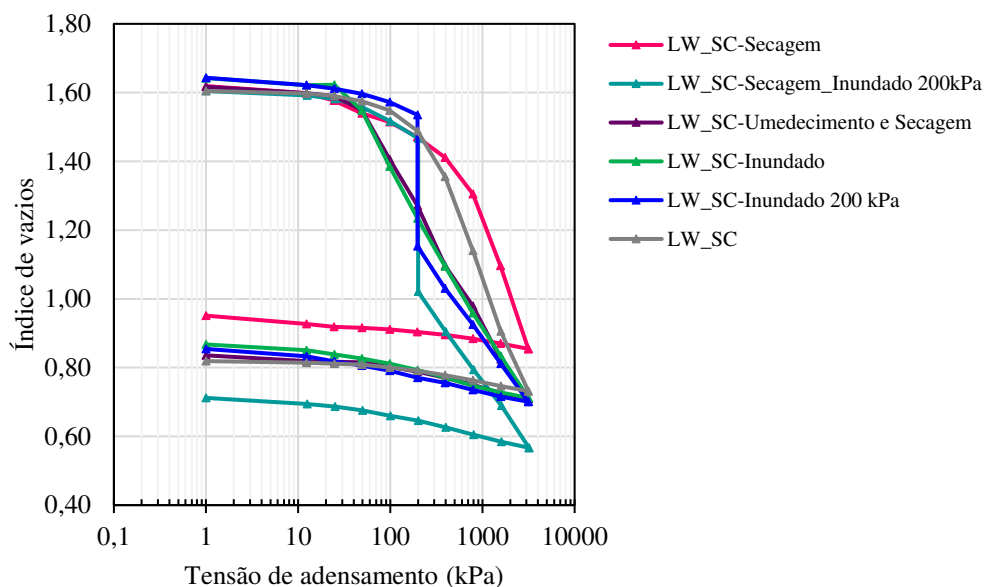


Figura 27: Curvas de compressão das estruturas LW_SC
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Para a condição de solo natural (SN), considerando o efeito da secagem na curva índice de vazios *versus* log da tensão vertical efetiva, percebe-se, através da Figura 26, que a secagem promoveu uma redução da tensão de cedência. Entretanto, no que se refere à variação total do índice de vazios durante o ensaio, percebe-se que não houve interferência significativa da secagem, quando se comparam os Δe dos CPs que tiveram as condições de moldagem preservadas (LW_SN) com os submetidos ao processo de secagem prévia (LW_SN_Secagem).

Já para a condição de solo com cimento (SC), conforme a Figura 27, a secagem gerou um aumento no valor da tensão de cedência e uma redução da variação total do índice de vazios durante o ensaio, que podem ser observados através do comparativo entre as curvas LW_SC e LW_SC_Secagem. Tais resultados remetem a um possível ganho de rigidez na estrutura de solo com cimento devido ao processo de secagem. Davies (2000) afirma que o processo de secagem depende das condições de ligação entre os vazios grandes. Nessa linha, considerando que os corpos de prova SN e SC apresentam distintas condições de ligações e diferentes índices de vazios iniciais, é plausível esperar-se que o efeito do processo de secagem seja distinto para cada condição, dado o fato que o processo em si ocorre de forma diferente, mesmo que as condições impostas para secagem (ao ar, temperatura de 25°C e período de 24hr) tenham sido as mesmas.

Considerando que o processo de secagem resulta em um aumento da sucção devido à saída da água e aumento da parcela de ar presente nos vazios, o ganho de rigidez observado na condição de solo com cimento pode ser explicado por esse aumento na sucção, que em contrapartida não promoveu ganhos expressivos de rigidez na condição de solo natural. Uma

das possíveis explicações pode ser observada a partir da análise comparativa das curvas de retenção LW_SN e LW_SC (Figuras 21 e 22), sendo tais curvas determinadas pelo processo de secagem.

Através do comparativo das curvas de retenção LW_SN e LW_SC, é possível observar que, a nível de macroporos, para um mesmo teor de umidade, estão associados maiores níveis de sucção para a condição SC comparativamente à SN. Assim, espera-se a presença de níveis mais expressivos de sucção com a secagem para SC do que SN, o que explica os maiores ganhos de rigidez.

Conforme previamente apresentado, considera-se que esse ganho de rigidez nas estruturas LW_SC promoveu o aumento na tensão de cedência. Dessa forma, no caso de LW_SN, em que não foi observado ganho expressivo de rigidez com a secagem, é possível explicar que a redução da tensão de cedência, observada através do comparativo das curvas LW_SN e LW_SN_Secagem (Figura 26), ocorre devida às deformações plásticas que surgem no processo de secagem (Davies, 2000) que ocasionam a redução do trecho de recompressão.

No que refere ao efeito dos ciclos de umedecimento e secagem na curva índice de vazios *versus* log da tensão vertical efetiva das condições de solo natural e solo com cimento, é possível constatar, através das Figuras 26 e 27, que o efeito desse processo se mostrou similar ao efeito produzido pela inundação dos corpos de prova antes do início do ensaio. A partir dos gráficos, observa-se a similaridade e quase sobreposição das curvas obtidas para as condições com inundação prévia e submetidas ciclos de umedecimento e secagem, tanto para a condição de solo natural quanto para solo com cimentação artificial.

Com base nesse comportamento, é possível supor que, assim como a inundação, a ciclagem foi capaz de destruir a condição metaestável inicialmente apresentada pelas estruturas. Tal suposição está de acordo com o apresentado na literatura técnica, em que variações de umidade e sucção podem condicionar o comportamento colapsível de um solo (Escario; Saez, 1973; Villar, 1995), de forma que, ao ser destruída a condição metaestável, é eliminado um dos fatores condicionantes à ocorrência do colapso.

Em vista da similaridade das curvas dos ensaios com inundação prévia e com corpos de prova submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, não foi realizada a análise do efeito da tensão de inundação de 200 kPa e o processo de ciclos de umedecimento e secagem, sendo tal investigação realizada apenas considerando o processo de secagem.

Com relação às análises de colapso referentes aos corpos prova submetidos à secagem ao ar, por 24 h antes do ensaio, à temperatura controlada e submetidos à inundação na tensão de 200 kPa durante o ensaio, as Figuras 26 e 27 indicam a não ocorrência de colapso para a

condição de solo natural (LW_SN_Secagem_Inundado 200 kPa) e ocorrência de colapso, em potencial maior que o observado na condição normal, para a condição de solo com cimento (LW_SC_Secagem_Inundado 200 kPa). Tais resultados convergem com as constatações observadas quanto ao efeito da secagem na compressibilidade e no ganho de rigidez nas misturas de solo com cimento.

Assim, a estrutura LW_SC, com o aumento da sucção devido à secagem, em conjunto com seu elevado índice de vazios e os aspectos microestruturais já apresentados neste trabalho, que configuram esta como uma estrutura suscetível ao colapso, apresentou um colapso para a inundação na tensão de 200 kPa (LW_SC_Secagem_Inundado 200 kPa) maior que o corpo de prova ensaiado com as condições de moldagem preservadas (LW_SC_Inundado 200 kPa). Além disso, essa rigidez, promovida pela secagem, resultou em uma maior deformabilidade dessa estrutura, tendo uma maior variação total do índice de vazios, conforme pode ser observada na Figura 27.

4 CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados no solo tropical residual estudado e considerando as particularidades desta pesquisa, foi possível obter as seguintes conclusões:

1. A caracterização geotécnica do solo natural e do solo com cimento indicou um deslocamento da curva granulométrica para o lado mais grosseiro e redução da plasticidade devido à adição de cimento e à presença de agregações no solo natural e no solo com cimento;
2. A variação da estrutura, considerando-se mesmos índice de vazios e peso específico aparente seco, sendo alterados o teor de umidade e a forma de obtenção das amostras, para cada condição de ligação entre as partículas avaliada (com e sem cimentação artificial), influenciou de forma expressiva no comportamento de um mesmo solo quanto à compressibilidade. Esses resultados reforçam a importância de se ter um controle rigoroso da umidade de campo e uma seleção adequada do método de compactação a ser adotado, independente se a obra envolver solo natural ou estabilização solo-cimento, em vista da alteração no comportamento mecânico que pode ser causada por uma variação desses condicionantes;
3. As estruturas investigadas apresentaram distinções a nível microestrutural, tendo-se, na estrutura obtida com menor teor de umidade, abaixo da ótima (LW), a

presença de fissuras que podem ser decorrentes de uma porosidade altamente comunicante. As estruturas obtidas a partir das amostras com umidade ótima (OW) apresentaram microporos e macroporos e não indicaram a presença de poros comunicantes. As amostras obtidas a partir do estado de lama (HW) apresentaram um aspecto mais homogêneo, sem a presença de poros maiores e com uma maior orientação de partículas. Tais características influenciaram diretamente no comportamento mecânico e hidráulico observado nos ensaios avaliados. Apesar de considerado um único solo, moldado com os mesmos índice de vazios e massa específica aparente seca, a variação no arranjo do esqueleto sólido devida à variação da quantidade de água (ou seja, da fase água do meio trifásico) promoveu alterações expressiva nas condições dos poros e orientação das partículas, o que alterou significativamente o comportamento do solo quanto à compressibilidade, suscetibilidade ao colapso e retenção de água;

4. A suscetibilidade do solo tropical residual estudado ao fenômeno do colapso se mostrou dependente da estrutura apresentada pelo solo, não sendo, portanto, intrínseca ao material. Os resultados apontaram uma dependência do teor de umidade e do processo segundo o qual as amostras foram preparadas para ocorrência ou não do colapso. Tais constatações permitem concluir que, para o solo tropical estudado, uma análise prévia desses condicionantes e a seleção adequada de parâmetros de compactação podem eliminar a suscetibilidade ao colapso desse material em campo;
5. A tensão atuante no solo no instante da inundação, em conjunto com o índice de vazios da amostra ensaiada e as alterações causadas pela cimentação artificial na micromorfologia da estrutura que se mostrou suscetível ao colapso, influenciou o potencial de colapso determinado a partir das metodologias empregadas. Isso ressalta a necessidade de uma análise conjunta dos possíveis fatores condicionantes da ocorrência do colapso para a compreensão da magnitude do fenômeno, proporcionando uma seleção mais apropriada de estratégias para mitigação ou eliminação do colapso;
6. A rigidez promovida pela cimentação artificial se mostrou distinta para as diferentes estruturas, sendo a quantidade de água empregada no preparo das amostras um fator indicado como essencial para que ocorressem as reações de hidratação do cimento CPV-ARI de forma adequada e a um nível em que fossem capazes de interferir na rigidez do solo residual argiloso estudado nesta pesquisa.

Esses resultados corroboram para a importância de se ter um controle de umidade de campo eficiente em obras que envolvem a estabilização solo-cimento, de forma que não ocorra em campo variações da rigidez obtida em relação à estimada em projeto;

7. A partir do estudo do potencial de colapso na estrutura que se mostrou suscetível a esse fenômeno (LW), foi possível inferir que o solo com cimento apresentou uma maior capacidade de suporte frente às tensões aplicadas, na condição não saturada, comparativamente ao solo natural. Para o intervalo de tensões entre 200 kPa e 1600 kPa, a sucção e a cimentação artificial, atuando de forma combinada, garantiram uma maior rigidez para a estrutura que apresentou maiores potenciais de colapso ao sofrer inundação. Esta análise é corroborada pela constatação experimental obtida nos estudos de ciclagem com a estrutura LW_SC. Após submetida à secagem, tendo, portanto, um aumento da sucção, a estrutura LW_SC apresentou um maior potencial de colapso do que a estrutura ensaiada com as condições de moldagem preservadas, para a tensão de inundação de 200 kPa. Tal resultado reforça a interferência da sucção, combinada com a cimentação artificial, em promover uma maior rigidez na estrutura na condição não saturada, que frente à inundação, sob queda brusca;
8. As análises baseadas na velocidade do pulso ultrassônico se mostraram satisfatórias para investigações das estruturas LW e OW e não muito adequadas para HW, devido ao elevado grau de saturação do solo nessa última ($S_r = 100\%$). Além disso, em corpos de prova das estruturas LW e OW saturados por capilaridade, não foi possível a leitura da VPU, confirmando a constatação da saturação ser prejudicial à propagação da onda. Essas constatações contribuem para a ressalva de que, apesar de a VPU ter se mostrado um parâmetro eficiente para a avaliação da variação da estrutura do solo, essa eficiência se mostra limitada à quantidade de água presente nos vazios. É possível inferir que o aumento da água presente nos vazios reduz a confiabilidade da VPU devido a sua interferência expressiva na propagação da onda;
9. No estudo da evolução da cimentação nas estruturas investigadas, todas apresentaram aumento da VPU com a idade de cura. Os valores da VPU para HW foram bem abaixo das outras estruturas, provavelmente devido à influência do elevado grau de saturação e da estrutura de partículas orientadas identificadas na microscopia. A estrutura OW apresentou os valores de VPU mais elevados das três,

sendo superiores aos da estrutura LW, devido à presença de sólidos interconectados mais intensificada na primeira (OW), o que resultou em um meio que permitiu uma melhor propagação de onda. Na estrutura LW, a presença de poros maiores e uma quantidade maior de bolhas de ar geraram um caminho de propagação mais lento, comparativamente a OW. Esses resultados contribuem para a validade da aplicação da VPU na constatação da variação das condições das estruturas apresentadas pelos corpos de prova;

10. Os resultados dessa pesquisa apontam para uma variação nos valores de VPU com a variação do arranjo do esqueleto sólido, orientação das partículas, ligações entre partículas e quantidade de água presente nos vazios. Essa constatação experimental permite inferir uma aplicação prática desse parâmetro para avaliação da qualidade de amostras indeformadas. Considerando a aferição da VPU em um bloco indeformado no momento de sua coleta e tendo-se mantida a integridade desse bloco, uma nova aferição da VPU no bloco deveria indicar o mesmo valor da primeira medida. Uma variação no valor da VPU poderia ser considerada como indicativo da alteração da estrutura do bloco;
11. Os resultados da curva de retenção de água indicaram que o solo tropical argiloso estudado possui comportamento bimodal e que a influência da variação da estrutura foi observada a nível de macroporos, sendo que, a nível de microporos, tal influencia se mostrou desprezível;
12. A presença de agregações no solo, identificada através da curva de retenção de água e dos ensaios de granulometria sem defloculante e de microscopia, influenciou a condição de dessaturação inicial, sendo observados baixos valores para a primeira entrada de ar da curva bimodal, não sendo estes valores típicos de solos de textura argilosa. Essas constatações reforçam a peculiaridade comportamental do solo estudado que, mesmo apresentando fração argila predominante, apresenta comportamento similar ao de uma areia se considerada a dessaturação inicial;
13. Os modelos de ajuste da curva de retenção, na configuração bimodal, que apresentaram as melhores correlações com os dados experimentais foram van Genuchten (dual-VG) e Kosugi (dual-KO), sendo possível a aplicação satisfatória de ambos para todas as condições de estruturas avaliadas. Assim, seria possível eliminar o uso de diferentes modelos de ajuste como uma variável presente na comparação dos diferentes comportamentos apresentados pelas diferentes estruturas;

14. Os ciclos de umedecimento e secagem nas condições investigadas indicaram alteração na compressibilidade, suscetibilidade ao colapso e nos valores de velocidade de pulso ultrassônico. Além disso, foi observada uma dependência da estrutura e do teor de umidade de moldagem no que se refere à capacidade da cimentação artificial em promover uma maior preservação da estrutura original da moldagem frente à ação da água e à secagem. Isso permite inferir que o umedecimento e a secagem influenciam diretamente nas condições de resistência à deformação e rigidez apresentadas pela estrutura do solo e que esta influência é variável com a presença ou não de cimentação artificial;
15. A técnica ultrassônica se mostrou eficiente para a análise dos efeitos da secagem e ineficiente para a investigação dos efeitos da saturação nas estruturas. Tais resultados ressaltam a limitação da aplicação da VPU, como parâmetro para estudo de variação da estrutura do solo, para condições em que a quantidade de água presente nos poros é elevada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBECHÉ, K.; BAHLOUL, O.; AYADAT, T.; BAHLOUL, A. **Treatment of collapsible soils by salts using the double consolidation method**. Proceedings of International Conference GeoShanghai, Shanghai, China. ASCE, Reston, VA, USA, 2010.

ABDALHUSEIN M.M; AKHTARPOUR A.; MAHMOOD, M.S. **Effect of Soaking on Unsaturated Gypseous Sand Soils**. International Journal of Civil Engineering and Technology, v. 10 n. 5, p. 550–558. 2019.

ABDALHUSEIN M.M; AKHTARPOUR A.; MAHMOOD, M.S. **Effect of Wetting Process with Presence of Matric Suction on Unsaturated Gypseous Sand Soils**. Journal of Southwest INTCSET 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. v. 1094. 2021.

ABDULLAH, Z.I.M.; AL-ATALLA, M.A.A.; ABDULLAH, F.A.M.A. **Relation between ultrasonic pulse velocity and some mechanical properties of clayey soil treated with lime**. Al-Rafadain Engineering Journal, v. 19, n.1, p. 15–25. 2011.

AL-SHAMOOSI, A. **Effect of Matric Suction on the Behavior of Unsaturated Gypseous Soil** (MScThesis2019), 2019.

AMAYA, L.V.P. **Avaliação de diferentes metodologias para reconstrução da curva de compressão oedométrica**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ASSIS, G.M.; CARDOSO, S.M.; SARRO, W.S.; FERREIRA, G.C.S. **Influência do teor de umidade na velocidade do pulso ultrassônico de solos estabilizados granulometricamente**.

In I Workshop de Ensaios Não Destrutivos Aplicados na Construção Civil, Faculdade de Tecnologia – UNICAMP, São Paulo. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75mm (n° 200)**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D2435**: Standard test method for One-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. PA: ASTM International. 2020.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D4186**: Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading. PA: ASTM International. 2012.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D4318-17e1**: Standard test methos for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D5298**: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. PA: ASTM International. 2016a.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D6836-16**: Standard test method for determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge. PA: ASTM International. 2016b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D5333**: Standard test method for Measurement of collapse potential of soils. PA: ASTM International. 2003.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D698-12:** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021a.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D7928-21e1:** Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D854-14:** Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2014.

BASMA, A.A.; Al-Homoud, A.S.; Malkawi, A.I.H.; Al-Bashabsheh, M.A. **Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays.** Applied Clay Science, v. 11, n. 2-4, p. 211-227, 1996.

BENATTI, J.C.B., RODRIGUES, R.A.; MIGUEL, M.G. **Aspects of Mechanical Behavior and Modeling of a Tropical Unsaturated Soil.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 31, p.1569-1585. 2013.

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

BORGES, C.R. **Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília-DF, Distrito Federal.** 2014. 112 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

BOSZCZOWSKI, R.B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.** 2008. 617 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2008.

BRESSANI, L.A. **Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos tropicais não saturados.** In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, São Carlos, v. 2, p. 617-628. 2004.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media.** Colorado State University, 1965.

BURDINE, N. **Relative permeability calculations from pore size distribution data.** Journal of Petroleum Technology, v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953.

CAMPBELL, G.S. **A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data.** Soil Science, v.117, n.6, p.311-314. 1974.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos – Teoria e Aplicações.** 8ª edição. LTC, Brasil, 2015.

CARVALHO, A.F. **Emprego da agitação horizontal na avaliação da estabilidade de agregados de cinco solos da região sudeste.** 1991. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

CARVALHO, J.C.; DE REZENDE, L.R.; CARDOSO, F.B.F.; LUCENA, L.C.F.L.; GUIMARÃES, R.C.; VALENCIA, Y.G. **Tropical soils for highway construction: Peculiarities and considerations**. *Transportation Geotechnics*, v.5, p.3–19. 2015.

CASAGRANDE, A. **Classification and identification of soils**. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, v. 113, n. 1, p. 901-930. 1948.

CHEN, J.; WANG, H.; YAO, Y. **Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction**. *Ultrasonics*, v.69, p.19-24. 2016.

CHEN, R.; NG, C. W. W. **Impact of wetting–drying cycles on hydro-mechanical behavior of an unsaturated compacted clay**. *Applied clay science*, v. 86, p. 38-46, dez. 2013.

CLEMENCE, S.P; FINBARR, A.O. **Design considerations for collapsible soils**. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. v. 107, n. 3, 1981.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York: ASCE, v.133, n.2, p.419-436, 2007.

CRISPIM, F.A. **Influência de variáveis de compactação na estrutura dos solos: caracterizações geotécnica, química, mineralógica e microestrutural**. 2010. 125 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CUSTÓDIO, G.S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados**. 2009. 187f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

DAVIES, G.I. **Análise e modelagem do comportamento colapsível de um solo arenoso**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

DENARDIN, A.P. **Estudo do comportamento mecânico de um solo saprolítico de basalto de Teutônia, RS**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA 259. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1996.

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

DUNER, W. **Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure**. *Water Resources Research*, v.30, n.2, p.211-223. 1994.

DUONG, T.V.; CUI, Y.; TANG, A.M.; DUPLA, J.; CANOU, J.; CALON, N.; ROBINET, A. **Effects of water and fines contents on the resilient modulus of the interlayer soil of railway substructure**. *Acta Geotechnica*, v.11, n.1, p.51–59. 2016.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: EMBRAPA, 574p. 2017.

ESCARIO, V.; SAEZ, J. **Graudal collapse of soils originated by a suction decrease**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8, Moscow, 1973. Anais. v.42, p.123-124. 1973.

FALCÃO, P.R.; BARONI, M.; MASSUTTI, G.C.; PINHEIRO, R.J.B.; FAGUNDES, D.F. **Assessment of the impact of inundation on the strength of a lateritic and collapsible soil**. Geotechnical and Geological Engineering. 2023.

FATTAH M.Y; DAWOO B. **Effect of Load History on Time-Dependent Collapse Behavior of Unsaturated Collapsible Gypseous Soils** (procds of the 16th asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering), 2019.

FATTAH, M.Y.; AL-ANI, M.M.; AL-LAMY, M.T. **Studying Collapse Potential of Gypseous Soil Treated By Grouting**. Soils and Foundations, v. 54, n. 3, p. 396–404. 2014.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. **The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils**. Geotechnical Testing Journal, v. 29, n. 5, p. 419-425, 2006.

FREDLUND, D G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Sons, 1993.

GARCIA, J.H.N.; LUIZ, A.M.F. **Avaliação do potencial de colapsibilidade de solos argilosos no município de Apucarana-PR**. Encontro Internacional de Produção Científica – XI EPCC. 2019.

GOMES, M.S.; GUIMARÃES, A.R.; MARQUES, M.E.S. **Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 9, n.5. 2018.

GUSMÃO, L.R.C. **Influência de ciclos secagem-molhagem no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde**. 2020. 161F. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. 2020.

GUTIERREZ, N.H.M. **Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná**. 2005. 325 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. **Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve**. Géotechnique, v. 66, n. 8, p.627-647. 2016.

HATANAKA, M.; MASUDA, T. **Experimental study on the relationship between degree of saturation and P-wave velocity in sandy soils**. In: Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation: Proceedings of the 2nd International Conference GEDMAR08, Nanjing, China 30 May–2 June, 2008. Springer Berlin Heidelberg, p. 346-351. 2008.

HEIDEMANN, M.; BRESSANI, L.A., GEHLING, W.Y.Y.; FLORES, J.A.A., PORTO, M.S. **Influence of structure in the soil-water characteristic curves of two residual soils of granite.** 3rd European Conference on Unsaturated Soils – E-UNSAT 2016. 2016.

HOUSTON, S.L.; HOUSTON, W.N.; ZAPATA C.E.; LAWRENCE, C. **Geotechnical engineering practice for collapsible soils.** Geotechnical and Geological Engineering, v.19, p.333–355. 2001.

IAN, J.; CHRIS, DF. R. **Chapter 32 Collapsible soils.** ICE Manual of Geotechnical Engineering (Thomas Telford Ltd) p. 391–411, 2012.

JEFFERSON, I.; SMALLEY, I. **Six definable particle types in engineering soils and their participation in collapse events: proposals and discussions.** In: Genesis and properties of collapsible soils. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 19-31. 1995.

JENNINGS, J.E.; KNIGHT, K. **A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to “collapse” of grain structure.** In: Regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering, 7, Proceedings. Durban, v. 1, p.99-105, 1975.

JIANG, M.J.; LIU, J.; SUN, Y.; YIN, Z. **Investigation into macroscopic and microscopic behaviors of bonded sands using distinct element method.** Soils and Foundations, v. 53, n.6, p.804-819, 2015.

JOTISANKASA, A.; RIDLEY, A.; COOP, M. **Collapse behavior of compacted silty clay in suction monitored oedometer apparatus.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 133, n. 7, p. 867–886. 2007.

KALANTARI, B. **Foundations on collapsible soils: a review.** Proceedings of Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering. v. 166, n. 2, p. 57-63, 2013.

KHALID, U.; YE, G.; YADAV, S.K.; ZHOU, A.; GU, L. **Consolidation pressure consequences on the soil structure of artificial structured marine clay: macro and micro evaluation.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 39, p. 247-263. 2021.

KODIKARA, J.; BARBOUR, S.; FREDLUND, D. G. **Structure development in surficial heavy clay soils: a synthesis of mechanisms.** Australian Geomechanics: Journal and News of the Australian Geomechanics Society, v. 37, n. 3, p. 25-40, 2002.

KOLAY, E.; BASER, T. **Estimating of the dry unit weight of compacted soils using general linear model and multi-layer perceptron neural networks.** Applied Soft Computing, v. 18, p. 223–231, 2014.

KOSUGI, K. **Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties.** Water Resources Research, v.32, n.9, p.2697-2703. 1996.

KRAUTKRAEMER, J.; KRAUTKRAEMER H. **Ultrasonic testing of materials.** Springer Science & Business Media. 2013.

LAWTON, E.C.; FRAGASZY, R.J.; HETHERINGTON, M.D. **Review of wetting-induced collapse in compacted soil.** Journal of Geotechnical Engineering Division. A.S.C.E, v. 118, n. 9, p.1137-1394, 1992.

LEONG, E. C.; CHENG, Z. Y. **Effects of confining pressure and degree of saturation on wave velocities of soils.** International Journal of Geomechanics, v. 16, n. 6, p. D4016013, 2016.

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. **Observations of pores and aggregates during affregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis.** Geoderma, v. 118, n. 3-4, p. 191-207, 2004.

LI, P.; VANAPALLI, S.K.; LI, T. **Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 8, p. 256-274. 2016.

LIM, Y.Y; MILLER, G.A. **Wetting-induced compression of compacted Oklahoma soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 130, n. 10, p. 1014-1023. 2004.

LOPES, M. M. S., ALVARENGA, R. D. C. S. S. A., PEDROTI, L. G., RIBEIRO, J. C. L., DE CARVALHO, A. F., CARDOSO, F. D. P. e MENDES, B. C. **Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints.** Construction and Building Materials, 205, 463-474. 2019.

LU, X.; YE, Z.; WANG, S.; DU, P.; LI, C.; CHENG, X. **Study on the preparation and properties of belite-ye'elinite-alite cement.** Construction and Building Materials, v. 182, p. 399–405, 2018.

LUONG, J.; DESTAIN, M.F.; MERCATORIS, B.C.N. **Characterisation of structural properties of soil using ultrasonic waves.** American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2014, v. 6, p. 4582-4593, 2014.

LUTENEGGER, A.J.; SABER, R.T. **Determination of collapse potential of soils.** Geotechnical Testing Journal, v. 11, n. 3, p. 173-178, 1988.

MACIEL, F.J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** 2003. 173f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2003.

MAHMOOD, A.S.; ABRAHIM, J.M. **A review of collapsible soils behavior and prediction.** IOP Conference Series Materials Science and Engineering, v. 1094, n. 1, 2021.

MAHMOOD, M.S. **Effect of Soaking on the Compaction Characteristics of Al-Najaf Sand Soil.** Kufa Journal of Engineering, v. 9, n. 2, p. 1–12. 2018.

MALTONI, K.L. **Estudo da compactação e adensamento em subsuperfície de latossolos sob diferentes usos.** 1994. 173 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

MANSOUR, Z. M.; CHIK, Z.; TAHA, M. R. **On the procedures of soil collapse potential evaluation.** Journal of Applied Sciences, v. 8, n. 23, p. 4434-4439. 2008.

McELREATH, R. **Statistical Rethinking: A Bayesian course with examples in R and Stan**. Chapman and Hall/CRC, 2018.

MEDERO, G.M.; SCHNAID, F.; GEHLING, W.Y. **Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 135, n. 6, p. 840-843, 2009.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. In 3rd edn. John Wiley AND Sons, Hoboken, New Jersey. 2005.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media**. Water resources research, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

MURTHY, V.N.S. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**. CBS Publishers and Distributors, New Delhi, India, 2010.

NALON, G.H.; RIBEIRO, J. C. L.; ARAÚJO, E.N.D.; PEDROTI, L. G.; CARVALHO, J.M.F.; SANTOS, R.F.; OLIVEIRA, D.S. **Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures**. Construction and Building Materials, v. 275, p.122-123. 2021.

NETO, M.P.C.; HERNÁNDEZ, O.; REINALDO, R. L.; BORGES, C.; CAICEDO, B. **Study of the relationship between the hydromechanical soil behavior and microstructure of a structured soil**. Earth Sciences Research Journal, v. 22, n.2, p.91–101. 2018.

NG, CH.W.W.; MENZIES, B. **Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering**. 1st Edition, Taylor & Francis, London. 2007.

NGUYEN, N.; HANNA, A. **At-rest earth pressure of overconsolidated collapsible soil subjected to full inundation**. Geotechnical and Geological Engineering, v.39, p.2019-2027. 2021.

NOWAMOOZ, H.; MASROURI, F. **Density-dependent hydromechanical behavior of a compacted expansive soil**. Engineering Geology, v. 106, n.3-4, p. 105-115, 2009.

OGILA, W.A.M.; ELDAMARAWY, M.E. **Use of cement kiln dust for improving the geotechnical properties of collapsible soils**. Indian Geotechnical Journal, v.52, p.70-85. 2021.

OLIVEIRA, N. M.; NETO, S. L. S. D.; FERRAZ, R. L.; PITANGA, H. N.; DA SILVA, T. O.; BARBOSA, P. S. A.; LIMA, D. C. **Influência da Estrutura na Curva Característica de Retenção e no Comportamento Colapsível de um Solo Tropical**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44. 2021.

OLIVEIRA, N.M. **Efeito da estrutura na compressibilidade de um solo residual maduro não saturado**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. **Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado**. 5^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.1, p. 279-28. 2004.

OTALVARO, I.F.; CORDÃO NETO, M.P.; DELAGE, P.; CAICEDO, B. **Compressibility and microstructure of compacted laterites**. Transportation Geotechnics, v. 5, p. 20-34, 2015.

OTALVARO, I.F.; CORDÃO NETO, M.P.; DELAGE, P.; CAICEDO, B. **Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil.** Engineering Geology, v. 205, p. 73-80, 2016.

OUZIA, A.; SCRIVENER, K. **The needle model: A new model for the main hydration peak of alite.** Cement and Concrete Research, v. 115, n. May 2017, p. 339–360, 2019.

PEREIRA, G.S.; PITANGA, H.N.; FERRAZ, R.L.; RODRIGUES, R.A.; SILVA, T.O.; NALON, G.H. **Ultrasonic Analysis of Artificial Cementation effects on Tropical Clay Soils.** Geotechnical and Geological Engineering, 2023.

PEREIRA, J.H.F.; FREDLUND, D.G. **Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil.** Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 126, n. 10, p. 907-916. 2000.

PEREIRA, T.T.C.; OLIVEIRA, F.S.; FREITAS, D.F.; DAMASCENO, B.D.; DIAS, A.C. **Mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo.** Genomos, v.28, n.1, p.1-14, 2020.

PINTO, C.S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** Oficina de Textos, 2020.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. **Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes.** Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, v. 229, n. 1-2, p. 443-456, abr. 2005.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; IVERSEN, B.V.; JACOBSEN, O.H. **Three-region Campbell model for unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 66, p.744-752. 2002.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H.J. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma. v. 314, p.122-137, 2018.

RAHARDJO, H.; KIM, Y.; SATYANAGA, A. **Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering.** In International Journal of Geo-Engineering, v.10, n. 1.2019.

RESENDE M., CURI N., REZENDE S.B., CORRÊA G.F., KER J.C. **Pedologia: base para distinção de ambientes.** Editora UFLA, Lavras, 378 pp. 2014.

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

REZAEI, M.; AJALLOEIAN, R.; GHAFoori, M. **Geotechnical properties of problematic soils emphasis on collapsible cases.** International Journal of Geosciences, v. 3, n. 1, p. 105-110. 2012.

RINALDI, V.; CAPDEVILLA, J. **Effect of cement and saturation on the stress-strain behavior of silty clay.** In Fourth International Conference on Unsaturated Soils. 2006.

RODRIGUES, R. A.; LOLLO, J. A. D. **Identificação dos Solos Colapsíveis**. In: Lollo, J. A. D. (Org.). Solos Colapsíveis – Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, p. 129-150. 2008.

RODRIGUES, R.A.; SOARES, F.V.P.; SANCHEZ, M. **Settlement of footings on compacted and natural collapsible soils upon loading and soaking**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2021.

ROMERO, E.; VAUNAT, J. **Retention curves of deformable clays**. In: TARANTINO, A.; MANCUSO, C. (Eds.). Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Trento. 2000.

ROMERO, E.; VECCHIA, G.D.; JOMMI, C. 2011. **An insight into the water retention properties of compacted clayey soils**. Géotechnique, v. 61, n.4, p.313-328. 2011.

SANTOS, R.A.; ESQUIVEL, E.R. **Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 10, n. 5, p. 986-991, 2018.

SARRO, W.S; FERREIRA, G.C.S. **Soil elastic modulus determined by Ultrasound tests**. Soil and Rocks, v.42, n.2, p.117-126. 2019.

SCHANZ, T.; KARIM, H.H. **Geotechnical characteristics of some Iraqi gypseous soils**. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, p. 01005. 2018.

SEKI, K. **SWRC-fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure**. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 4, p. 407-437. 2007.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M.T. **Closed-form hydraulic conductivity for multimodal unsaturated soil hydraulic properties**. Vadose Zone Journal, v.21, n.1. 2022.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M.T. **Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties**. Journal of Hydrology and Hydromechanics. v.71, n.1, p.22-34. 2023.

SELÇUK, L.; SEKER, V. **Predicting California bearing ratio of foundation soil using ultrasonic pulse velocity**. Proceedings of the institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, v. 172, n. 4, p. 320- 330. 2019.

SILVEIRA, I. A.; RODRIGUES, R.A. **Collapsible behavior of lateritic soil due to compacting conditions**. International Journal of Civil Engineering, v. 18, n. 10, p. 1157-1166, 2020.

SILVEIRA, P.E.D.; REIS, F.A.G. **Procedimentos de avaliação de solos colapsíveis por meio de correlação entre ensaios edométricos e ensaios SPT**. Revista Geociências, v. 40, n. 3, p. 651-660. 2021.

SIVAKUMAR, V.; WHEELER, S.J. **Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay**. Géotechnique, v.50, n.4, p.359-368. 2000.

SOUSA, M.A.S.; MOTTA, L.M.G.; COUTINHO, R. Q. **Análise da aplicabilidade de solos tropicais finos em estruturas de pavimento flexível utilizando o novo Método de**

Dimensionamento Nacional (MeDiNa). In 35° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Novembro, 2021.

SU, Z.; FRATTA, D.; TINJUM, J.M.; EDIL, T.B. **Cementitiously stabilized materials using ultrasonic testing.** In Proceedings of TRB 2013 Annual Meeting, Washington, DC, USA. Transportation Research Board (TRB), Washington, DC, USA, pp. 1–23, 2013.

TADDY, M. **Business Data Science: Combining Machine Learning and Economics to Optimize, Automate, and Accelerate Business Decisions.** Nova York: McGraw-Hill, 2019.

TANG, C.S.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; SHI, B. **Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils.** Engineering Geology, v. 114, n.3, p. 261-266, 2010.

TANG, C.S.; WANG, D.Y.; SHI, B.; LI, J. **Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions,** Catena, v. 139, p. 105-116, 2016.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London: Academic Press, 1997.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI A.J. **Intemperismo e formação do solo.** In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo, p.139-166.2000.

TRINDADE, T.P. **Caracterização tecnológica de solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em estradas e em obras geotécnicas de caráter ambiental.** 2006. 254 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 44, n.5, p.892-898. 1980.

VANAPALLI, S.K.; ADEM, H.H. **Elasticity moduli of expansive soils from dimensional analysis.** Geotechnical Research, ICE publishing, v.1, n.2, p.60-72. 2014.

VANDANAPU, R.; OMER, J.R.; ATTOM, M.F. **Laboratory simulation of irrigation-induced settlement of collapsible desert soils under constant surcharge.** Geotechnical and Geological Engineering. 2017.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** 2. ed., São Paulo, McGraw Hill do Brasil, 509 p. 1978.

VILAR, O.M.; RODRIGUES, J.E. NOGUEIRA, J.B. **Collapsible soils: a problem for tropical soil engineering.** In: Proc., 1st Brazilian Symposium Tropical Soils, J. Medina, ed., COPPE, Rio de Janeiro, p.209-224. 1981.

VILAR, O.M. **Suction controlled oedometer tests on a compacted clay.** In: International Conference on Unsaturated Soil, 1 UNSAT'95, Paris, 1995. França, Anais, v.1, p.201-206. 1995.

VILAR, O.M.; RODRIGUES, R.A. **Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table.** Canadian Geotechnical Journal, v. 48, n. 2, p. 226–233. 2011.

VINOTH, G.; MOON, S.W.; MOON, J.; KU, T. **Early strength development in cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements.** Soils and Foundations, v. 58, n. 5, p. 1200-1211, 2018.

YE, G.; LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; FRAAJI, A. L. A. **Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement.** Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 491 – 497. 2004.

ZHANG, J.; ZHANG, S.; XU, T. **Individual effect of matric suction on soil microstructure and hydraulic conductivity.** KSCE Journal of Civil Engineering, v. 24, n.5, p.1448–1459. 2020.

ZHANG, T.W.; CUI, Y.J.; LAMAS-LOPES, F.; CALON, N.; D'AGUIR, S.C. **Compacted soil behaviour through changes of density, suction and stiffness of soils with remoulding water content.** Canadian Geotechnical Journal, v. 55, n. 2, p. 182-190, 2018.

ZOU, W.; HAN, Z.; VANAPALLI; S.K.; ZHANG J.; ZHAO, G. **Predicting volumetric behavior of compacted clays during compression.** Applied Clay Science, v. 155, p. 116-225, 2018.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ULTRASSÔNICA DOS EFEITOS DA CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL EM SOLOS TROPICAIS ARGILOSOS ¹

Resumo: As misturas de solo com cimento têm aplicações práticas na engenharia geotécnica. Peculiaridades associadas aos ganhos de rigidez e resistência proporcionados pela cimentação ao longo do tempo de cura precisam ser investigadas, especialmente para solos tropicais. Poucos estudos investigaram misturas de solos tropicais e cimento Portland de alta resistência inicial, a fim de compreender as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas associadas às alterações mineralógicas e microestruturais causadas pela cimentação artificial. Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da cimentação em um solo argiloso tropical através da aplicação do método ultrassônico e de forma correlacionada com os resultados dos outros ensaios propostos. A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) foi avaliada para as condições de solo natural e misturas de solos com diferentes teores de cimento (1%, 2%, 3%, 5%, 7%), em diferentes tempos de cura, considerando a propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. Foram também realizados análises mineralógicas e microestruturais, caracterização geotécnica, ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à compressão simples (RCS), e investigação físico-química através da variação volumétrica. A resposta ultrassônica revelou efeitos diretos da cimentação na micromorfologia, plasticidade e granulometria. Uma microestrutura com poros maiores foi transformada em uma estrutura densa com partículas ligadas por compostos cimentícios, o que proporcionou novos caminhos para a propagação de ondas ultrassônicas (aumentos de VPU superiores a quatro vezes para um teor de cimento de 7%, comparativamente à VPU do solo natural) e uma maior resistência mecânica à aplicação de cargas cíclicas e estáticas. Foram observadas tendências de aumentos praticamente lineares de VPU, RCS e MR com a adição de cimento. Foi observada correlação linear satisfatória entre os valores de VPU e MR ($R^2 > 0,8968$) ou RCS ($R^2 > 0,8925$).

Palavras-chave: misturas de solo com cimento; velocidade de pulso ultrassônico; tempo de cura; resistência; rigidez.

¹ Artigo publicado pela *Geotechnical and Geological Engineering*. Aceito em 01 de Novembro 2023. Publicado em 21 de Novembro 2023. Primeiro autor: Géssica Soares Pereira. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02690-4>.

1 INTRODUÇÃO

Os solos argilosos tropicais são encontrados em regiões de clima quente e úmido e têm inúmeras características e peculiaridades de comportamento resultantes de seus processos geológicos e pedológicos. As argilas são conhecidas por causar inúmeros problemas e dificuldades na construção devidos ao recalque excessivo e à resistência limitada. Portanto, técnicas de estabilização para melhorar suas propriedades de engenharia têm sido vastamente aplicadas (Chan; Ch'ng, 2011).

Materiais tratados com cimento são largamente utilizados na engenharia civil (Jing *et al.*, 2022). Fatores como custo-benefício, facilidade de realização da mistura e ganhos de resistência e rigidez em curtos períodos de tempo fazem do uso do cimento uma técnica atrativa de estabilização dos solos (Wu *et al.*, 2021). A proporção de cimento adicionado ao solo depende do comportamento de engenharia pretendido no produto resultante (Sanbonsuge *et al.*, 2017).

Melhorias no comportamento mecânico, como o aumento da resistência e da rigidez, ocorrem devido às reações de hidratação e endurecimento proporcionadas pela inclusão do cimento e suas interações com os minerais de argila (Ferreira *et al.*, 2022). Segundo Sasanian e Newson (2014), tentativas limitadas foram feitas para investigar o efeito da mineralogia do solo na cimentação artificial. Nessa linha, os estudos que envolvem análises mineralógicas do solo e das misturas de solo-cimento possuem grande importância.

O comportamento hidromecânico de solos artificialmente cimentados é influenciado por diversos fatores, como o tipo de solo e suas propriedades físico-químicas, tipo e quantidade do cimento empregado, condições de preparo da mistura, teor de umidade de moldagem, densidade final da mistura, fator vazios/cimento e condições de carregamento (Consoli *et al.*, 2007; 2012).

Outro aspecto que influencia no desempenho mecânico de uma mistura de solo com cimento é o tempo de cura. De acordo com Sanbonsuge *et al.* (2017), o aumento de sua rigidez com o tempo de cura está associado aos componentes presentes no cimento, bem como aos compostos gerados durante o processo de hidratação. Michell e El Jack (1966) observaram que a mistura de solo com cimento muda da condição de partículas dispersas para a de massa homogênea ao longo do processo de hidratação do aglomerante. Segundo Jing *et al.* (2022), a transformação do solo de um material particulado para um material cimentado faz do estudo dos solos cimentados uma tarefa mais complexa.

Sarro *et al.* (2021) afirmam que, devido ao processo natural de formação dos solos, existem heterogeneidades significativas entre os seus variados tipos e nas condições nas quais

são empregados, seja no estado natural ou compactado. Para a aplicação prática de solos estabilizados com cimento em projetos geotécnicos, é necessária a moldagem de inúmeros corpos de prova para ensaios destrutivos, o que limita sua reutilização para outras análises (Ferreira *et al.*, 2022). Portanto, é necessário aplicar tecnologias mais avançadas para as investigações de amostras de solo, a fim de utilizá-las em aplicações de engenharia civil.

Nessa linha, o uso de testes não destrutivos que permitam a replicabilidade dos resultados é significativamente relevante. Esses tipos de testes são cada vez mais usados para determinar as propriedades dos materiais, o que é bem ilustrado pelo crescimento dinâmico das publicações científicas nessa área (Wang *et al.*, 2020). Várias técnicas e métodos não destrutivos são comumente usados (Miturski *et al.*, 2021), como, por exemplo, os ensaios baseados na propagação de ondas ultrassônicas.

Três tipos diferentes de ondas podem ser transmitidos por corpos elásticos: ondas longitudinais ou de compressão, ondas de cisalhamento ou transversais e ondas de Rayleigh. As ondas longitudinais se propagam na mesma direção do deslocamento da partícula. As ondas de cisalhamento se movem perpendicularmente à direção do deslocamento da partícula. As ondas de Rayleigh são ondas de superfície que se propagam na superfície externa de um meio (Weidinger *et al.*, 2009).

Diferentes métodos para medição de ondas de cisalhamento têm sido amplamente utilizados. De acordo com Meysam (2021), métodos avançados de laboratório vêm sendo utilizados para medir velocidades de ondas cisalhantes em solos, como *bender elements* (BE), teste de carga quase estática, técnica de anel atuador piezoelétrico e o ensaio de coluna ressonante (RC). Youn *et al.* (2008) relataram que a técnica BE é não destrutiva, permitindo repetição de ensaios em um mesmo corpo de prova. Além disso, é uma técnica que pode ser implementada na maioria dos aparelhos de laboratório, facilitando assim as comparações com outros resultados. De acordo com os autores, a subjetividade na determinação do tempo de chegada é um problema crítico nos ensaios de BE. Devido à sua alta consistência, os dispositivos usados na técnica RC são considerados os mais confiáveis (Meysam, 2021).

Para a medição de ondas longitudinais, a técnica ultrassônica tem sido amplamente aplicada. É uma das técnicas mais populares de ensaios não destrutivos (Miturski *et al.*, 2021). A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) mede o tempo necessário para que uma onda se propague através do corpo de prova. Entre os vários tipos de ondas de ultrassom, as mais importantes são as longitudinais (Miturski *et al.*, 2021), que são o tipo de ondas medidas nesta pesquisa. Além das ondas longitudinais, a técnica ultrassônica também pode ser usada para propagação de ondas cisalhantes.

A técnica ultrassônica tem sido amplamente utilizada para a caracterização de rochas e de diversos materiais de construção, como madeira, matrizes cimentícias e metais (Arman; Paramban, 2021; Baghbani *et al.*, 2023; Sarro; Ferreira, 2019; Wang; Han, 2020). Além disso, tem sido utilizada com eficiência em estudos investigativos envolvendo solos (Sarro; Ferreira, 2019; Alkiki *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2022).

Selçuk e Seker (2019) afirmam que, teoricamente, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU), um parâmetro ligado à densidade e ao módulo elástico dos materiais e, portanto, fortemente afetado pela rigidez do material, consiste em um indicador eficiente das propriedades do solo para avaliar a sua capacidade de suporte.

Alguns autores estudaram a aplicação da técnica ultrassônica em corpos de prova de solo compactado e em obras geotécnicas. Tais estudos envolveram a análise da isotropia de solos compactados (Christ; Park, 2009) e a definição de fatores, tais como densidade do solo, teor de umidade, índice de vazios, estrutura do solo, energia e grau de compactação e os tipos de transdutores empregados, entre outros, que podem interferir na VPU (Ferreira *et al.*, 2014; Kolay; Baser, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Dongqing *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2016; Sarro *et al.*, 2015).

Uma boa relação entre a resistência à flexão e a velocidade de onda longitudinal para argila, silte, areia e materiais granulares estabilizados com cinzas volantes e cal foi relatada por Mandal *et al.* (2016). Kutanaei e Choobbasti (2016) avaliaram os efeitos das partículas de nanosílica e das fibras de álcool polivinílico (PVA) na velocidade de pulso ultrassônico e nas propriedades mecânicas da areia cimentada. Os autores obtiveram uma correlação satisfatória entre a resistência à compressão não confinada e a VPU, embora a velocidade seja uma propriedade ligada a pequenas deformações e a resistência seja uma propriedade ligada à ocorrência de grandes deformações do material.

Embora um esforço significativo tenha sido dedicado ao estudo do uso de técnicas ultrassônicas para a investigação de solos estabilizados, ainda há uma quantidade limitada de informações relacionadas ao uso da técnica ultrassônica para avaliar solos argilosos tropicais. Ainda não foi dada a devida atenção à aplicabilidade das medições de VPU para a análise dos ganhos de resistência e rigidez proporcionados pela cimentação artificial, considerando diferentes adições percentuais de cimento e tempos de cura distintos, alinhados com a avaliação das alterações dos parâmetros geotécnicos devidas à adição de cimento às argilas tropicais. Além disso, existe uma falta de correlações entre os valores de VPU e as propriedades das misturas de solo com cimento, considerando solos tropicais.

Este estudo tem como objetivo ampliar o conhecimento sobre os efeitos da cimentação artificial em argilas tropicais e fornecer correlações entre VPU, propriedades físicas e mecânicas de solos naturais e misturas de solo com cimento. A relevância deste estudo pode ser avaliada a partir de duas perspectivas principais. Em primeiro lugar, ele contribui para o avanço em direção a uma compreensão mais aprofundada dos efeitos da cimentação artificial em argilas tropicais e sua relação com a mineralogia do solo. Essa contribuição é muito desafiadora, dada a alta variabilidade das propriedades do solo tropical e a complexidade de estabelecer relações comportamentais. A segunda perspectiva envolve o estabelecimento de correlações entre as propriedades físicas e mecânicas de misturas de argila tropical e cimento com a VPU, uma técnica não destrutiva com ampla aplicação em engenharia.

Para entender completamente os efeitos da cimentação artificial na argila tropical e sua heterogeneidade inerente, é necessário avaliar as propriedades físicas e mecânicas, a mineralogia e a microestrutura do solo natural e das misturas de solo-cimento. Portanto, foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos para essas avaliações. Este trabalho apresenta a aplicação da técnica ultrassônica para o estudo dos efeitos da cimentação em amostras de solo, com o objetivo de investigar os ganhos de resistência e rigidez de misturas de um solo argiloso com diferentes porcentagens de cimento, submetidas a vários períodos de cura. Essa avaliação busca entender a relação entre a VPU e diferentes variáveis investigadas, considerando a vantagem dos ensaios não destrutivos para a realização de uma análise da evolução temporal utilizando o mesmo corpo de prova.

Para análise comparativa dos dados de resistência e rigidez e correlações com os dados obtidos nos ensaios ultrassônicos, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples ou não confinada (RCS) e módulo resiliente (MR), pois são métodos diretos de avaliação da resistência mecânica e da rigidez resiliente dos materiais, respectivamente. Embora na literatura técnica sejam relatadas correlações entre RCS e VPU para uma ampla variedade de solos, ainda existe uma falta de estudos correlacionando VPU e MR.

Tendo em vista a heterogeneidade inerente aos solos, a presente pesquisa foi subsidiada por análises mineralógicas e microestruturais, além de avaliações das alterações causadas pela cimentação artificial nas propriedades geotécnicas do solo argiloso, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos resultados obtidos experimentalmente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Solo

O solo selecionado, de ocorrência expressiva na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais, Brasil, consiste em um solo residual maduro de gnaiss, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, com granulometria argilo-areno-siltosa. O solo apresenta a seguinte distribuição granulométrica: 64% de partículas de argila ($\phi < 0,002$ mm), 12% de partículas de silte ($0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm), 24% de partículas de areia ($0,06$ mm $< \phi < 2,0$ mm) e 0% de partículas de pedregulho (2 mm $< \phi < 60$ mm), de acordo com a classificação do M.I.T (*Massachusetts Institute of Technology*) (Casagrande, 1948), considerando a classificação dos solos baseado no tamanho das partículas.

De acordo com a Classificação Unificada segundo a D2487 (ASTM, 2017a), o solo foi classificado como um silte de alta plasticidade (MH). A classificação do solo segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996), é LG', o que indica um comportamento laterítico. Segundo Sanbonsuge *et al.* (2017), em geral, solos lateríticos são estáveis por natureza, e o cimento age como aditivo de ganhos de resistência e rigidez.

Para a caracterização química e a identificação dos óxidos que compõem o solo, foi empregada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), cujos resultados são apresentados na Tabela 1. O valor da perda ao fogo registrado foi de 11,49%.

Tabela 1: Caracterização química do solo (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl
27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27

Pela Tabela 1, é possível observar a ocorrência de compostos químicos típicos dos solos residuais e constatar um predomínio dos compostos sílica e alumina e também uma quantidade significativa de óxido de ferro. No que se refere aos óxidos alcalinos e alcalinos terrosos (CaO, MgO e K₂O), foram constatados baixos teores.

Além do FRX, para a caracterização química do solo, foi realizada a determinação do pH em água de acordo com os procedimentos prescritos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017), sendo encontrado o valor de 5,63, o qual, segundo Neto *et al.* (2019), encontra-se na faixa de valores típicos de solos com comportamento laterítico.

A caracterização mineralógica do solo (Figura 1) foi obtida a partir da técnica de Difração de Raios-X (DRX), utilizando o difratômetro *Bruker D8 Discover* com radiação $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), com o ângulo 2θ variando de 5° a 55° , utilizando passo de $0,05^\circ$ em uma aquisição de 1 segundo por passo.

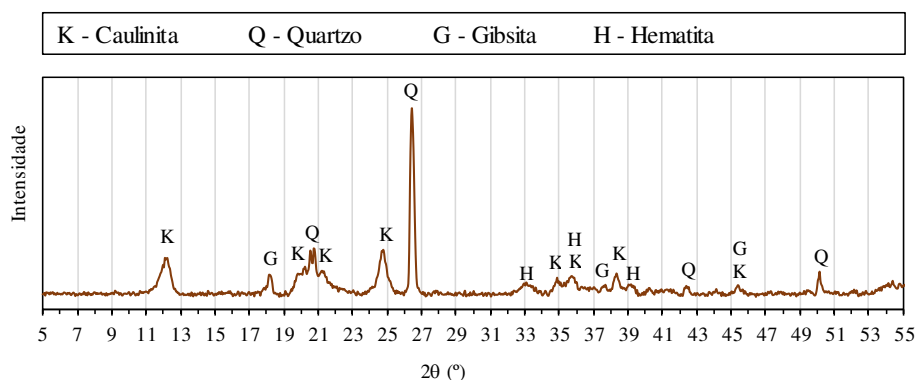


Figura 1: Difratograma do solo argiloso tropical

Analisando o difratograma da Figura 1, foram identificados os seguintes minerais: caulinita, quartzo, gipsita, hematita. Assim como a maioria dos solos brasileiros, devido a sua formação ser dada em condições tropicais (EMBRAPA, 2017), o solo avaliado é caulínico, o que, segundo Lopes *et al.* (2019), se deve ao fato deste solo ter como seus principais constituintes minerais a caulinita e o quartzo, justificando, conseqüentemente, os elevados níveis de SiO_2 e Al_2O_3 previamente detectados (Tabela 1).

Outro aspecto que pode ser observado através do difratograma do solo (Figura 1) é a presença de mais picos, e de maior intensidade, da caulinita, quando comparados aos picos da gipsita. Uma possível explicação para tal resultado, considerando a afirmação de Pereira *et al.* (2020), consiste no fato de que a proporção entre caulinita e gipsita é, de modo geral, inversamente relacionada, em que a gipsita representa o mineral dominante em solos muito alterados e depósitos de bauxita, e a caulinita é o mineral dominante nas zonas menos intemperizadas. A presença da caulinita ainda é justificada pelos fatores que favorecem sua formação, como os citados por Resende *et al.* (2014), a saber, clima quente e úmido, com drenagem livre, mas sem uma lixiviação excessiva, e baixo pH. O solo selecionado se enquadra em tais fatores ao observar-se o fato de este ter sido formado em um país de clima tropical (Brasil) e apresentar um pH ácido (baixos valores).

2.1.2 Cimento Portland

Como material cimentante a ser adicionado ao solo, foi adotado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), por sua alta reatividade inicial, fator que evita a ocorrência de reações tardias entre cimento e solo. Na Tabela 2, são apresentados os resultados da caracterização física do cimento.

Tabela 12: Caracterização física do cimento CPV-ARI.

Ensaio	Normas Técnicas	Resultados
Massa Específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,065 g/m ³
Área Específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)	1892 m ² /kg
Índice de finura	NBR 11579 (ABNT, 2013)	0,1 %
Consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018a)	32,8 g
Expansibilidade	NBR 11582 (ABNT, 2016)	Frio – 0,2 mm
		Quente – 0,1 mm
Tempo de Pega	NBR 16607 (ABNT, 2018b)	Início – 15:04
		Fim – 15:58
Resistência à Compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019a)	3 dias – 45,6 MPa
		7 dias – 50,0 MPa
		28 dias – 61,0 MPa

A caracterização mineralógica do cimento (Figura 2) foi obtida a partir da técnica de DRX, utilizando-se o mesmo equipamento e as mesmas considerações de ensaio adotados para o solo.

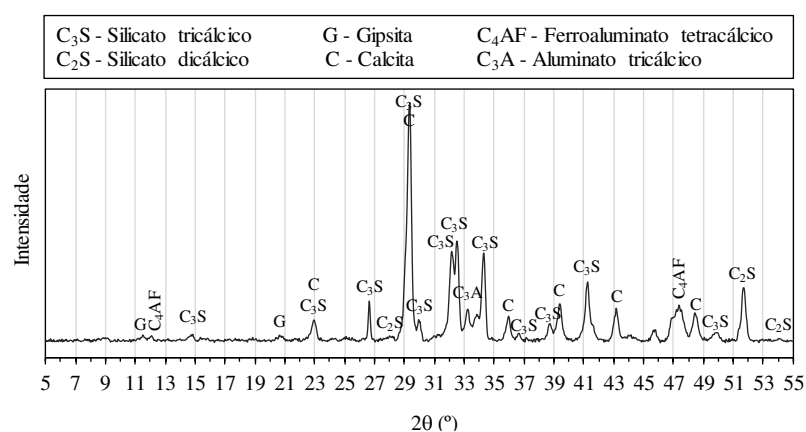


Figura 2: Difratograma do cimento

Com base na análise do difratograma da Figura 2, foram identificados picos referentes aos cristais alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato (C₃A) e ferrita (C₄AF), e às fases cristalinas calcita (CaO) e gipsita (CaSO₄.2H₂O). Além disso, foi possível observar a presença de picos

significativos de alita (C_3S), o que já era esperado para um cimento CPV, pois sua quantidade determina a resistência do cimento Portland nas idades iniciais (Ouzia; Scrivener, 2019).

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação de amostras e cura

Para estudar a influência da cimentação artificial no solo residual tropical, foram avaliadas cinco porcentagens diferentes de cimento Portland CPV-ARI: 1%, 2%, 3%, 5% e 7%. A quantidade de cimento usada em cada mistura foi calculada com base na massa de solo seco e considerando o teor de umidade alvo. Todas as amostras de solo foram preparadas com o teor de umidade ótimo do solo natural (31,9%). A Figura 3 apresenta a curva de compactação Proctor Normal do solo natural obtida conforme a D698-12 (ASTM, 2021a).

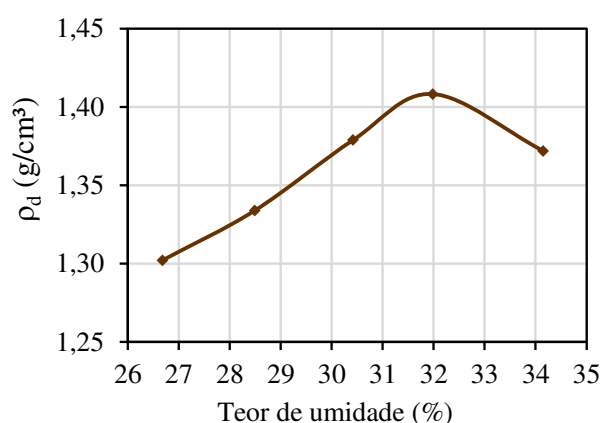


Figura 3: Curva de compactação Proctor Normal do solo natural

O mesmo teor de umidade foi empregado na preparação de todas as amostras e corpos de prova deste estudo, a fim de reduzir o número de variáveis experimentais. De acordo com Consoli *et al.* (2007), as mudanças na resistência e na rigidez devidas ao efeito da cimentação artificial em solos provavelmente estão relacionadas às estruturas criadas durante o processo de moldagem. Esses autores também afirmam que a quantidade de água disponível no sistema também desempenha um papel fundamental na formação dessas estruturas. Portanto, utilizando o mesmo teor de umidade inicial para a preparação das misturas de solo-cimento, é possível obter uma avaliação mais direta dos efeitos do teor de cimento na formação dessas estruturas e associar as diferenças com a variação do teor de cimento.

Para os ensaios geotécnicos, mineralógicos e de pH, foram preparadas amostras deformadas de solo natural e misturas de solo com cimento. Para a produção das misturas, o solo, o cimento e a água foram pesados e, em seguida, misturados até que se atingisse uma consistência uniforme. Uma peneira foi usada no processo de homogeneização para evitar a formação de grumos. Depois de misturar material suficiente para realizar todos os ensaios, cada amostra foi armazenada em sacos plásticos completamente vedados para evitar a perda de umidade. Os sacos com as misturas de solo-cimento foram armazenados em uma sala com umidade e temperatura controladas por um período de cura de 7 dias. Após esse período, as amostras curadas foram secas até a umidade higroscópica, com base em procedimentos semelhantes aplicados às amostras de solo natural preparadas para os ensaios de caracterização. Em seguida, foi aplicado o protocolo regular prescrito pelas normas de cada ensaio realizado.

No que se refere aos ensaios não destrutivos (VPU e MEV) e os destrutivos (RCS e MR), os corpos de prova foram compactados estaticamente. Para produzir os corpos de prova de solo natural, o solo umedecido foi misturado em um recipiente hermético e aguardado um período de 24 horas para a homogeneização da umidade. Já para os corpos de prova das misturas de solo com cimento, os métodos de preparação foram os mesmos previamente apresentados para os ensaios de caracterização, mas sem considerar-se os procedimentos referentes ao tempo de cura. Portanto, as amostras foram compactadas imediatamente após a homogeneização. O tempo necessário para a mistura e a compactação foi sempre inferior a 45 minutos devido ao uso de cimento Portland de alta resistência inicial.

Pesquisas anteriores sugeriram que o índice de vazios, a energia de compactação e a estrutura do solo afetam a propagação das ondas ultrassônicas (Adem; Vanapalli, 2015; Oh; Vanapalli, 2016). Outros trabalhos indicaram que a quantidade de água, a densidade do solo e o tipo de transdutor também afetaram as medições de VPU (Ferreira *et al.*, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Sarro *et al.*, 2015; Champiré *et al.*, 2016; Dongqning *et al.*, 2016; Chen *et al.* 2017). Portanto, um único valor de referência de peso específico seco ($10,77 \text{ kN/m}^3$) e índice de vazios (1,60) foram selecionados para a moldagem de todos os corpos de prova desta pesquisa, tratados com cimento e não tratados. Consequentemente, as variações observadas na VPU estariam relacionadas principalmente aos efeitos da cimentação artificial observados em cada corpo de prova preparado em condição distinta de cimentação. Isso também pode ser considerado para os corpos de prova destinados aos ensaios de MEV, RCS e MR.

Conforme apontado anteriormente, o processo de compactação estática foi usado para a moldagem de todos os corpos de prova. O grau de compactação adotado foi inferior a 100% (78%), a fim de obter um valor mais elevado de índice de vazios e que permitisse uma análise

mais eficiente dos efeitos da cimentação. Essa escolha foi baseada na premissa de que incrementos no grau de compactação causariam reduções na porosidade e diminuiriam a magnitude dos efeitos da cimentação (Venson, 2015), o que está fora do objetivo desta pesquisa. Além disso, maiores valores de índice de vazios estão associados a maiores volumes de poros na estrutura do material, o que possibilita a análise das alterações promovidas pela cimentação artificial nos poros do solo por meio da técnica de MEV (Filho; Tessier, 2009). Outro aspecto relevante é apontado por Aversa *et al.* (1993), que identificaram que os efeitos estruturais do cimento são mais evidentes em amostras com maior porosidade.

Após a compactação, as amostras de solo-cimento foram completamente envolvidas em papel filme plástico e armazenadas em sacos plásticos vedados para evitar a perda de umidade. As amostras foram colocadas em uma sala com umidade e temperatura controladas para a cura.

2.2.2 Caracterização geotécnica, mineralógica e microestrutural

Para a caracterização geotécnica das condições de solo natural e solo com cimentação artificial, os efeitos da variação do teor de cimento foram investigados com base na influência da cimentação nos parâmetros geotécnicos do solo listados na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaio de caracterização geotécnica

Ensaio	Norma técnica
Granulometria completa	D7928(ASTM, 2021b)
Limites de Atterberg	D4318 (ASTM, 2017b)
Massa específica dos grãos	D854 (ASTM, 2014)

Para a investigação do pH das misturas de solo com cimento, foi utilizado um peagâmetro e foram considerados os procedimentos prescritos pela EMBRAPA (2017). A caracterização mineralógica das misturas foi obtida por DRX, e a caracterização microestrutural das estruturas geradas pelos diferentes teores de cimento foi obtida por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por elétrons secundários. Para as análises de MEV, as amostras de solo com cimento com idade de 7 dias de cura e as amostras de solo natural foram montadas em *stubs* do MEV e revestidas com ouro por pulverização catódica em um Quorum Q150RS.

2.2.3 Método Físico-Químico

Para o estudo das mudanças físico-químicas ocasionadas pela adição de cimento ao solo, foi adotado o método físico-químico empregado na dosagem de misturas de solo com cimento conforme as diretrizes da ME 414 (DNIT, 2019). Segundo a ME 414 (DNIT, 2019), o método físico-químico possui como princípio a interação elétrica do cimento com as partículas da fração argila do solo, que contribui para mudanças físico-químicas complexas nas misturas de solo com cimento.

Nessas misturas, as partículas de cimento se comportam como carregadas eletricamente e sua presença no solo aumenta a condutividade elétrica da massa de solo com cimento compactada. Esta interação com coloides negativamente carregados, juntamente com a hidratação do cimento, produz mudanças físico-químicas rápidas, gerando variações volumétricas substanciais quando a mistura está suspensa em água. A norma ME 414 (DNIT, 2019) indica que o teor de cimento que promover a maior variação volumétrica é indicativo do teor de cimento mínimo necessário para a estabilização do solo. Na Figura 4, é apresentado o ensaio.



Figura 4: Provetas graduadas utilizadas no ensaio do método físico-químico

Com a aplicação da análise do princípio citado, foi possível obter a curva de variação volumétrica em função do teor de cimento e evidenciar quais teores enquadram as misturas em solo melhorado com cimento e em solo estabilizado com cimento, além de subsidiar as análises de variações de resistência e rigidez promovidas pela variação do teor de cimento.

2.2.4 Técnica ultrassônica

A análise do efeito da cimentação na velocidade de propagação de onda do pulso ultrassônico foi realizada com base nos dados coletados pelo indicador digital ultrassônico não

destrutivo portátil (PUNDIT), cujos transdutores possuem uma frequência de 54 kHz. A configuração de arranjo dos transdutores adotada no ensaio, ilustrada através da Figura 5, foi a correspondente ao método direto, o qual, segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019b), maximiza a transmissão e o recebimento da energia do pulso ultrassônico pelo corpo de prova.

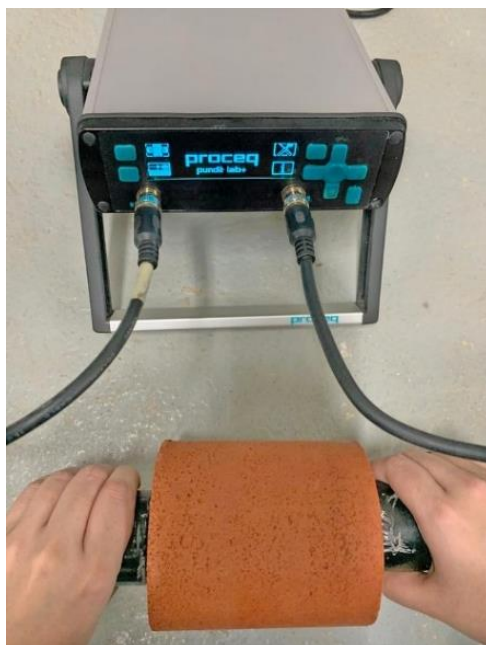


Figura 5: Arranjo ilustrativo do posicionamento dos transdutores com um corpo de prova descoberto.

Os corpos de prova foram totalmente envolvidos por um filme plástico durante os ensaios e suas extremidades foram parcialmente cobertas por uma camada de gel à base de água, para que fosse preservada a integridade do corpo de prova durante o período de cura analisado nesta pesquisa, evitando seu contato direto com o gel. É válido ressaltar que, antes da realização dos ensaios, foram testados os mesmos corpos de prova nas condições embalada com papel filme plástico e não embalada, sendo constatado que a presença do papel filme não interferiu nos valores de medições da VPU.

Dessa forma, durante a execução do ensaio, as faces dos corpos de prova, envoltos por uma película de papel filme totalmente aderida, eram parcialmente cobertas com uma camada de gel à base de água, e os transdutores do PUNDIT acoplados e firmemente pressionados nas superfícies dos corpos de prova. O equipamento era então acionado, e ondas longitudinais de pulso ultrassônico eram geradas através dos corpos de prova. Depois de percorrida a distância referente à altura dos corpos de prova, o PUNDIT realizava a medição do tempo de viagem da onda e fornecia o valor da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU). Este procedimento de ensaio foi realizado por outros pesquisadores para registro da velocidade de

propagação do pulso ultrassônico (Sarro; Ferreira, 2019; Selçuk; Seker, 2019; Nalon *et al.*, 2021).

Para a investigação do efeito da cimentação de todos os teores de cimento investigados, foram efetuadas leituras de VPU em corpos de prova de dimensões distintas e considerando-se os tempos de cura de 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 56 dias.

As distintas dimensões foram obtidas pela moldagem dos CPs em anéis de 54 mm de diâmetro e 20 mm de altura (Corpo de prova A – SA), em cilindros de 100 mm de diâmetro e 127 mm de altura [dimensões padrão para ensaio Proctor Normal (Corpo de prova B – SB)] e cilindros de 152 mm de diâmetro e 122 mm de altura [dimensões padrões para ensaio CBR (Corpo de prova C – SC)].

2.2.5 Parâmetros mecânicos de rigidez e resistência à compressão

Para avaliar a variação da rigidez em função do percentual de cimento adicionado ao solo, os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados de acordo com a norma ME 134 (DNIT, 2018), que é similar à AASHTO T307-99 (AASHTO, 2017). Embora o escopo dessa norma tenha se concentrado em solos não tratados, várias pesquisas aplicaram essa norma para estudar solos tratados com agente químico (Arshad, 2019; Rabab'ah *et al.*, 2020; Festugato *et al.*, 2021). Portanto, entende-se que a aplicação dos mesmos métodos para investigação de misturas cimentadas é uma abordagem razoável (Festugato *et al.*, 2021).

Como o principal objetivo deste trabalho foi obter o parâmetro Módulo de Resiliência (MR) do solo natural e das misturas de solo com cimento, foram usados os pares de tensão para materiais de subleito sugeridos pela norma, considerando, para a etapa de condicionamento, o par de tensões $\sigma_3 = 0,07$ MPa e $\sigma_d = 0,07$ MPa. Após esta etapa, a determinação do Módulo de Resiliência foi dada a partir da aplicação dos pares de tensões indicados na Tabela 3 da ME 134 (DNIT, 2018).

O MR foi calculado como a média aritmética dos valores correspondentes a todos os pares de tensões utilizados no ensaio, de acordo com as recomendações da IS-247 (DNIT, 2021). Os corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram testados na prensa triaxial cíclica apresentada na Figura 6. Foram ensaiados três corpos de prova por condição avaliada, sendo o resultado final de MR a média desses resultados.



Figura 6: Prensa de ensaio triaxial cíclico utilizada para ensaios de MR

Para avaliar a variação da resistência em função do percentual de cimento adicionado ao solo, os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) foram realizados de acordo com a norma NBR 12025 (ABNT, 2012), a qual é similar à D1633 (ASTM, 2017c). Os corpos de prova cilíndricos com dimensões de ensaio Proctor Normal foram testados em uma taxa de deformação padronizada de 1 mm/min. De acordo com Consoli *et al.* (2007), os testes de RCS são utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura técnica para verificar a importância dos fatores que afetam a resistência dos solos cimentados. Os ensaios de RCS também foram aplicados para avaliar criticamente a adequação das substituições de outros materiais aglutinantes, como a nanossílica (Gullu *et al.*, 2023). Portanto, a determinação desse parâmetro no presente estudo foi uma estratégia importante para entender melhor os efeitos do cimento no solo tropical argiloso. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização mineralógica, microestrutural e geotécnica

Os resultados da caracterização mineralógica, obtidos através da técnica de DRX para o solo natural (SN) e o solo com as distintas adições de cimento (SC), são apresentados na Figura 7.

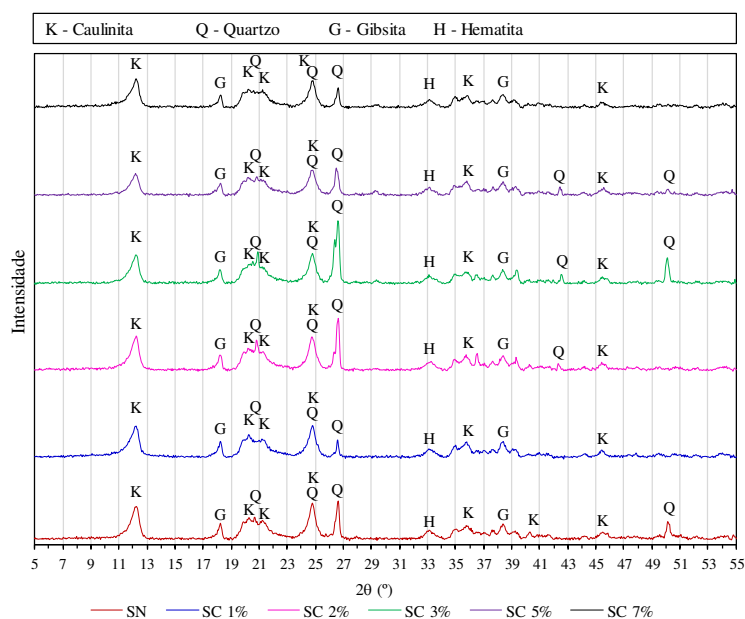


Figura 7: Difratograma do solo natural e das misturas de solo com cimento

Analisando os difratogramas da Figura 7, foram identificados os picos característicos referentes aos seguintes minerais: caulinita, quartzo, gibsite e hematita. Os produtos da hidratação do cimento, como os silicatos de cálcio hidratado (CSH e CASH) e o aluminato de cálcio hidratado (CAH), não foram identificados de forma clara, o que também foi relatado por outros autores (Chrysochoou, 2014; Tabet *et al.*, 2018). Isso ocorre porque esses produtos de hidratação do cimento não apresentam uma estrutura tão cristalina quanto a apresentada pelos minerais encontrados nas frações do solo, de modo que a natureza amorfa intrínseca dos produtos de hidratação do cimento os torna transparentes aos raios-X (Wei *et al.*, 2012; Suh *et al.*, 2020). Tabet *et al.* (2018) apontam fatores adicionais, como a composição variável e a estrutura desorganizada das fases cristalinas, além das baixas concentrações de cimento nas misturas com solo.

Para avaliar a ocorrência de reações de hidratação do cimento, apesar de não terem sido identificados os picos no DRX, foi realizado um teste rápido envolvendo a aspersion de fenolftaleína 1% em procedimento similar ao adotado por Lyra e Monteiro (2021) para a análise da frente de carbonatação em corpos de prova de concreto. Conforme pode ser observado através da Figura 8, foi constatada a alteração da coloração para roxo nos corpos de prova de solo com cimento, indicando a geração de um meio alcalino, e o corpo de prova de solo natural se mantendo incolor devido ao seu pH ácido. A geração do meio alcalino nas misturas é resultado da liberação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado, provenientes da reação do cimento com a água presente no solo, o que gera um aumento do pH da mistura (Basso *et al.*, 2003).

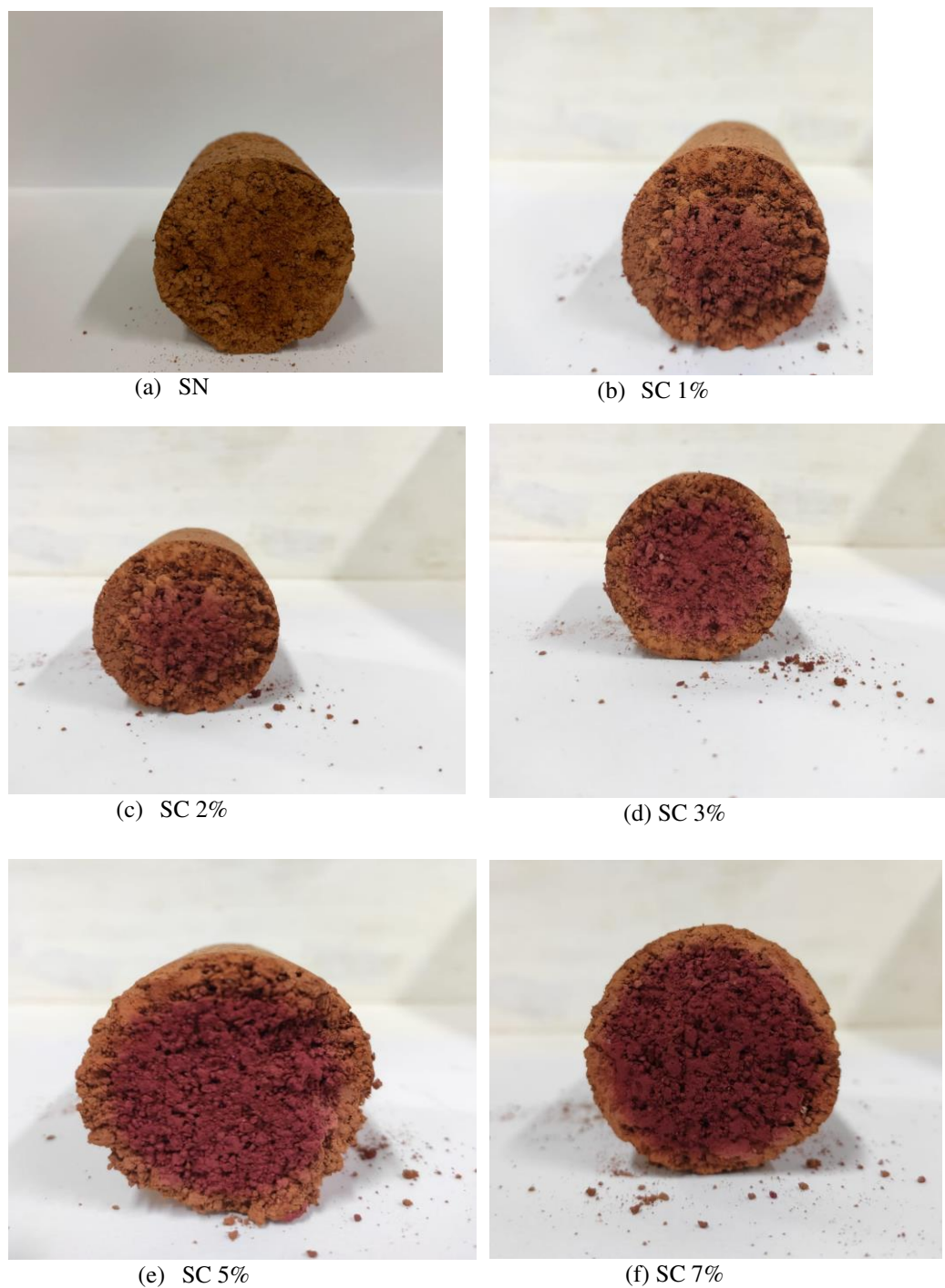


Figura 8: Imagens dos corpos de prova após a ação da fenolftaleína: (a) Solo natural; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento

Além desse teste rápido, foi medido o pH do solo e das misturas de solo com cimento, cujos resultados são apresentados na Figura 9.

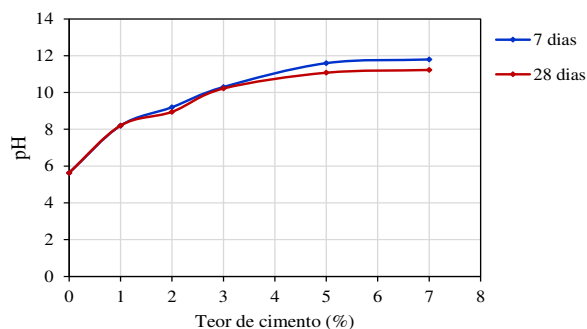


Figura 9: Variação do pH com o teor de cimento

Os valores de pH apresentados na Figura 9 indicam a formação do meio básico, já identificado nos testes com fenolftaleína, uma vez que o pH de todas as misturas de solo com cimento avaliadas foram maiores do que 7 ($\text{pH} > 7$). Além disso, é possível perceber um aumento do pH das misturas com o aumento do teor de cimento adicionado, de modo que uma maior quantidade de cimento presente na mistura implica em maior nível de basicidade. Quanto maior o teor de cimento, mais reações de hidratação ocorrem, o que resulta em uma elevação mais significativa do pH da mistura.

O aumento do pH com o aumento do teor de cimento se deve à aglomeração da concentração de íons de cálcio Ca^{++} na superfície da argila, levando a mudanças na estrutura da argila tratada com cimento (ou seja, à formação de uma matriz argilo-cimentícia floculada), conforme discutido nas análises de MEV. Santamarina *et al.* (2001) também observaram um efeito semelhante do pH nas mudanças da estrutura de um sistema argila-água-eletrólito.

A Figura 9 mostra que o valor do pH aumenta rapidamente em teores mais baixos de cimento, mas a taxa é moderada em teores mais altos. Resultados semelhantes foram obtidos por Chew *et al.* (2004) em estudos de uma argila marinha tratada com cimento.

Comparando os valores de pH aos 7 e 28 dias, é possível observar uma ligeira diminuição do pH à medida que o tempo de cura aumenta para misturas de solo com cimento com teores de cimento de 3%, 5% e 7%. Alkiki *et al.* (2021) observaram um comportamento semelhante. Segundo esses autores, a diminuição do pH com o aumento do tempo de cura está relacionada à quantidade reduzida de íons Ca^{++} e $(\text{OH})^-$ devida ao desenvolvimento de reações pozolânicas.

No que se refere à caracterização microestrutural das estruturas compactadas de solo natural e solo com cimento, os resultados das imagens obtidas através do MEV são apresentados na Figura 10.

Comparando-se a imagem da estrutura de solo natural (Figura 10a) com as correspondentes às estruturas com adições de cimento (Figuras 10b a 10f), é possível constatar

uma mudança da micromorfologia devida à adição do material cimentante ao solo. Observa-se uma provável tendência de redução dos macroporos com o aumento do percentual de cimento, resultando em estruturas com mais microporos. A explicação para tal tendência, segundo Horpibulsuk (2012), consiste no fato de que os produtos cimentícios não apenas aumentam a resistência da união entre os aglomerados, mas também preenchem os espaços vazios do solo e reduzem significativamente o volume dos poros.

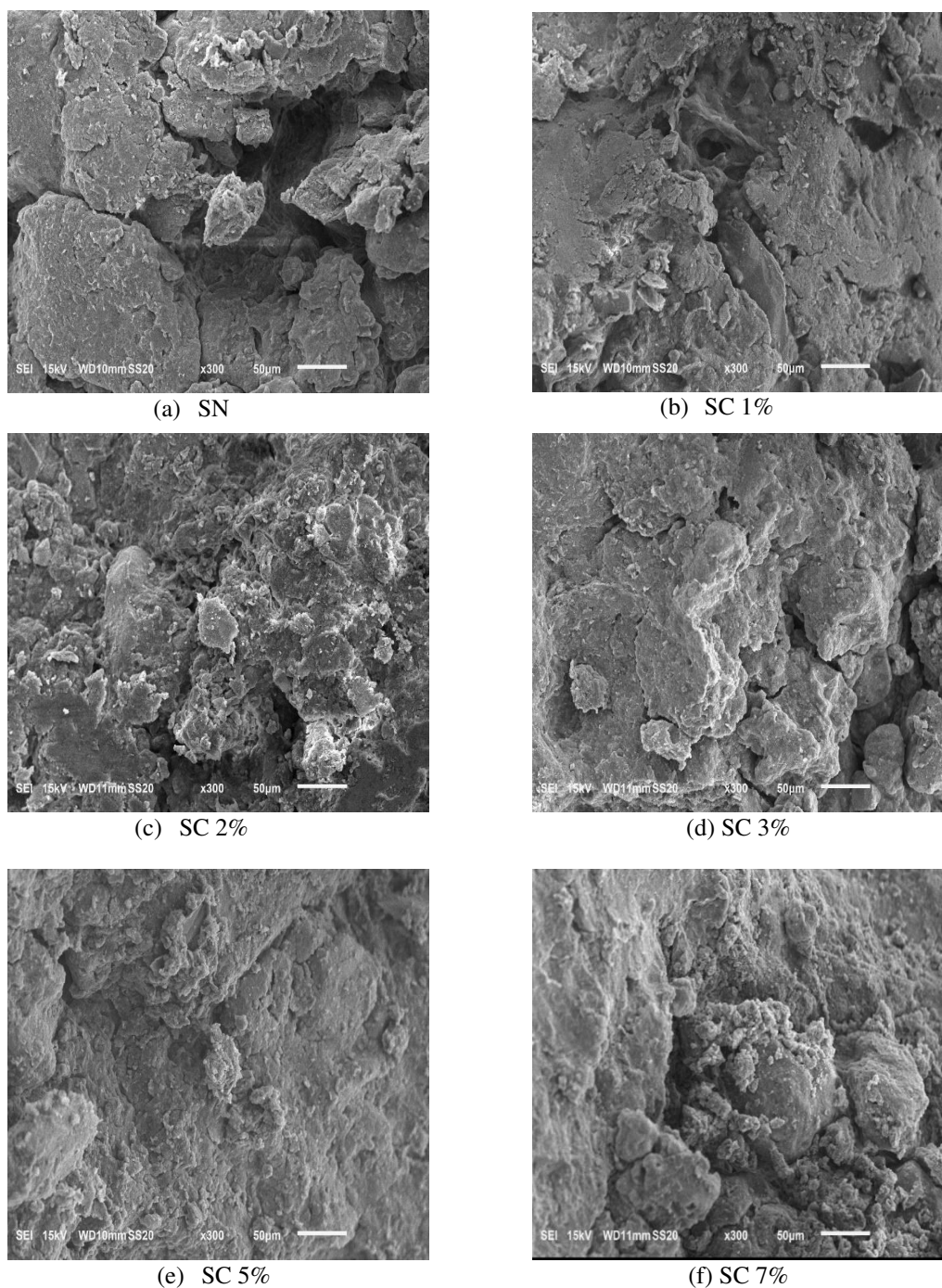


Figura 10: Micrografias das estruturas obtidas (x300): (a) Solo natural; (b) Solo com 1% de cimento; (c) Solo com 2% de cimento; (d) Solo com 3% de cimento; (e) Solo com 5% de cimento; (f) Solo com 7% de cimento

Uma análise comparativa das micrografias da Figura 10 sugere uma mudança de uma estrutura inicial aberta com partículas isoladas e macroporos maiores (amostra de solo natural) para uma estrutura dominada pela matriz (amostras de mistura de solo com cimento). É possível associar essa mudança à presença de ligações cimentícias (pontes) entre as partículas, resultando em uma forte ligação entre as partículas de solo, e à formação de uma matriz de partículas finas ao redor das partículas maiores (agregações), que aumenta com o incremento do teor de cimento.

Outros autores relataram observações semelhantes sobre mudanças microestruturais devidas à adição de cimento. Mengue *et al.* (2017) concluíram que a estrutura de corpos de prova se mostrou mais rígida do que a estrutura dos corpos de prova de solo natural quando o teor de cimento aumentou. De acordo com Alkiki *et al.* (2021), a investigação de amostras de solo cimentado revelou mudanças microestruturais de estruturas porosas para estruturas mais densas com menos formação de poros.

Os resultados das análises do efeito da cimentação artificial nos parâmetros geotécnicos [massa específica dos sólidos (ρ_s), granulometria e limites de Atterberg (LL, LP)] são apresentados nas Figuras 11, 12 e 13, respectivamente.

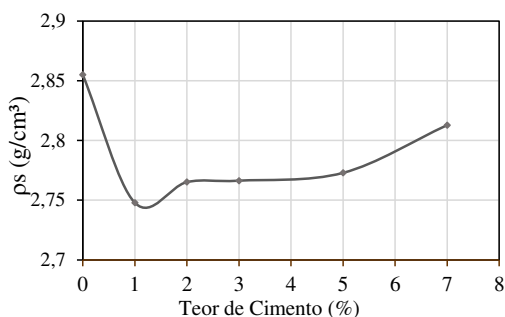


Figura 11: Variação da ρ_s com o teor de cimento

Analisando a Figura 11, é possível observar que a adição de cimento ao solo promoveu uma redução da massa específica dos sólidos. A massa específica dos sólidos é influenciada pela composição química e estrutura cristalina dos minerais que determinam a densidade dos grãos. Neste contexto, é possível considerar que as variações de valores na massa específica dos sólidos, devidas aos diferentes percentuais de acréscimo de cimento, são ligadas à variação da mineralogia decorrente da mistura de materiais (solo e cimento) de composições mineralógicas distintas, conforme é possível observar pelos resultados de DRX apresentados nas Figuras 1 e 2. Assim, da mistura de materiais com densidades de grãos distintas e em

proporções diferentes resultou a variação da massa específica dos grãos das misturas de solo com cimento investigadas.

Na Figura 12, é possível observar que a adição do cimento promoveu alteração na granulometria do solo argiloso natural, de forma que quanto maior o percentual de cimento adicionado mais significativa foi a mudança granulométrica.

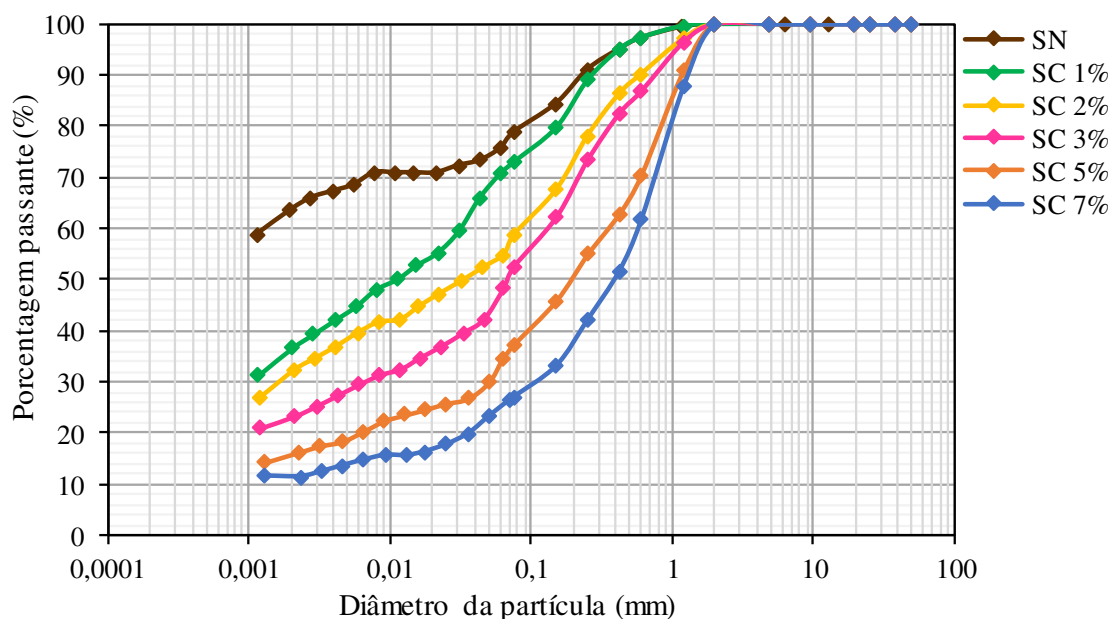


Figura 12: Variação da granulometria com o teor de cimento

O deslocamento das curvas granulométricas das misturas de solo com cimento para o lado grosseiro deve-se à floculação das partículas do solo natural devida à ação do agente cimentante. Conforme já mencionado, nos testes rápidos com borrifação de fenolftaleína e uso do peagômetro, foi observado o indicativo de alteração do meio originalmente ácido do solo para básico nas misturas. Essa elevação do pH, em conjunto com o aumento da concentração eletrolítica da água intersticial e a redução da espessura da dupla camada difusa, são responsáveis pelo fenômeno de floculação observado nas misturas.

O deslocamento mais significativo para os maiores teores de cimento adotados nas misturas está ligado ao fato de o crescimento do valor de pH ter se mostrado diretamente proporcional ao aumento da quantidade de cimento adicionada (Figura 12). Assim, é possível inferir que a uma maior elevação do pH nas misturas investigadas associa-se uma ocorrência mais expressiva do fenômeno de floculação.

O aumento do teor de cimento promoveu um aumento na porcentagem de partículas de tamanho de areia ($0,06 \text{ mm} < \phi < 2 \text{ mm}$) e uma redução na porcentagem de partículas de tamanho de argila ($\phi < 0,002 \text{ mm}$) na mistura. A ação das reações de floculação resultou na

aglutinação de partículas finas de solo, formando agregações com dimensões maiores, o que explica a redução da porcentagem de partículas finas e o aumento da porcentagem de partículas grossas (Figura 12). Resultados semelhantes foram observados por Mengue *et al.* (2017), de modo que os autores concluíram que a aglutinação de grãos se torna mais evidente à medida que o teor de cimento aumenta.

A Figura 13 mostra que a adição de cimento ao solo argiloso gerou reduções expressivas no limite de liquidez (LL). De acordo com Chew *et al.* (2004), as mudanças no LL com a adição de cimento parecem ser altamente dependentes do tipo de solo. Os autores apontaram que, para solos com alta plasticidade, que é o caso do solo investigado neste estudo, o encapsulamento de aglomerados de argila por produtos cimentícios depositados tem um efeito dominante, levando a reduções no LL.

No que se refere ao limite de plasticidade (LP), foram observadas pequenas variações nos valores, que foram caracterizadas principalmente por pequenas reduções para a adição de baixos teores de cimento e pequenos aumentos para altas dosagens de cimento. Entretanto, essas variações se mostraram muito pequenas e todos os valores de LP foram muito semelhantes. Portanto, esses resultados não parecem ser indicativos de nenhuma tendência evidente relacionada ao aumento do teor de cimento. Na verdade, as diferenças nos valores de LP podem ser associadas à variabilidade inerente dos procedimentos do ensaio.

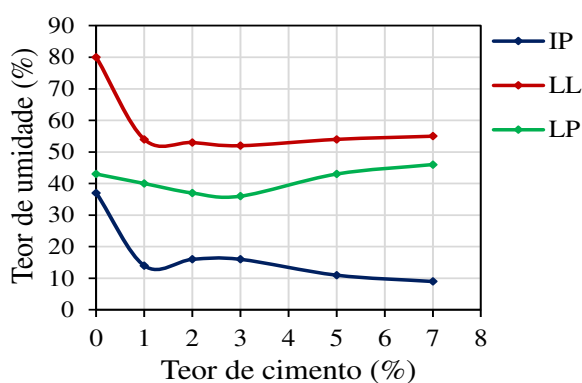


Figura 13: Variação dos limites de Atterberg e do IP com o teor de cimento

Caputo (2015) aponta a granulometria e a composição mineralógica como fatores que influenciam diretamente o Índice de Plasticidade (IP) do solo. Dessa forma, o indicativo de uma redução da plasticidade do solo devida às adições de cimento pode estar mais relacionado às variações granulométricas do que às alterações mineralógicas. Considerando-se os resultados de granulometria, foi observada uma expressiva redução da fração de argila com o aumento do teor de cimento na mistura (Figura 11), que provavelmente influenciou na redução do LL e,

consequentemente, do IP. Adicionalmente, os resultados de DRX (Figura 7) não indicaram uma alteração expressiva de mineralogia do solo natural devida às adições de cimento.

O processo de troca de cátions entre o solo e os agentes estabilizadores é outra explicação para a tendência observada de redução do IP com o aumento do teor de cimento. Outros estudos também constataram que a adição de cimento a solos argilosos causou uma redução nos valores de LL e IP (Croft, 1967; Nelson; Miller, 1992; Al-Rawas *et al.*, 2005; Ikhlef *et al.*, 2014).

3.2 Curva de variação volumétrica *versus* teor de cimento

Na Figura 14, são apresentadas as curvas de variação volumétrica em função do teor de cimento, obtidas pela aplicação do Método Físico-Químico ME 414 (DNIT 2019) nas composições das misturas de solo com cimento avaliadas. Foi realizado um total de quatro ensaios para esta análise.

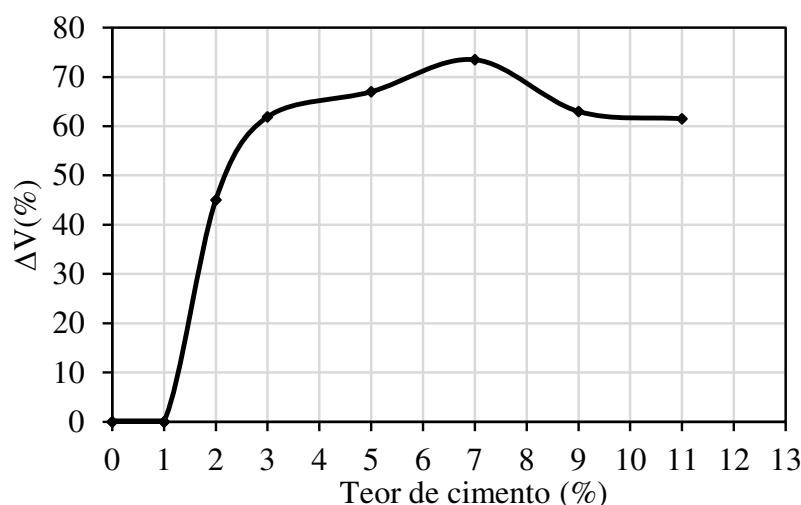


Figura 14: Variação volumétrica *versus* teor de cimento adicionado ao solo

Nas curvas resultantes do ensaio (Figura 14), foram observados picos de variação volumétrica em torno do teor de 7% de cimento (pontos de satisfação das curvas). Segundo Chou (1977), o teor de cimento necessário para a estabilização satisfatória de uma mistura de solo com cimento é geralmente crescente com os teores de silte e argila, o que, de acordo com Croft (1967), resulta na condição de que solos muito argilosos exigem grandes quantidades de cimento. Assim, o elevado teor de cimento necessário para produzir a máxima variação na suspensão da mistura de solo com cimento durante o ensaio evidencia o caráter argiloso do solo

estudado, teor este que, segundo a ME 414 (DNIT, 2019), é aceito como sendo o mínimo para a estabilização química do solo. Este método pode ser, portanto, considerado como auxiliar na dosagem solo-cimento, indicando o teor de cimento mínimo necessário para a estabilização química da mistura.

Através da análise da Figura 14, é possível observar uma variação volumétrica crescente com o teor de cimento até atingir o teor de 7%. De acordo com Chadda (1971), o aumento gradual dessa variação volumétrica, decorrente da interação elétrica do cimento em hidratação e as partículas coloidais de argila que, carregadas negativamente, produzem rápidas alterações físico-químicas, prossegue até o ponto em que a concentração de cimento atinge o limite de saturação requerido para produzir uma mistura estável.

Neste sentido, percebe-se que os menores teores de cimento apresentam alterações físico-químicas distantes das necessárias para que se tenha a estabilização da mistura (Figura 14), de forma que esses percentuais de cimento são capazes de alterar a granulometria e a plasticidade (Figuras 12 e 13), mas não produzem ganhos muito expressivos de rigidez (Figuras 15, 18 e 19 a seguir), podendo ser enquadrados, de acordo com DNIT (2006), como “solos melhorados com cimento”. Já para os teores mais próximos dos picos de variação volumétrica, ou seja, próximos da condição de estabilização química do solo, incluindo o próprio teor mínimo para estabilização da mistura (7%), as alterações físico-químicas são expressivas, o que explica os incrementos mais significativos de rigidez e resistência para esses teores (Figuras 11, 14 e 15 a seguir), tendo-se uma alta rigidez típica das misturas denominadas “solos estabilizados com cimento” (Sanbonsuge *et al.*, 2017).

3.3 Análise da técnica ultrassônica para estudo do efeito da cimentação em solos

Na Figura 15, são apresentados os resultados das investigações do efeito do tempo de cura e do percentual de cimentação artificial na VPU, considerando-se as condições de solo natural e solo com diferentes percentuais de cimento adicionados (1%, 2%, 3%, 5% e 7%), corpos de prova de distintas dimensões e analisando-se as idades de cura de 0, 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 56 dias.

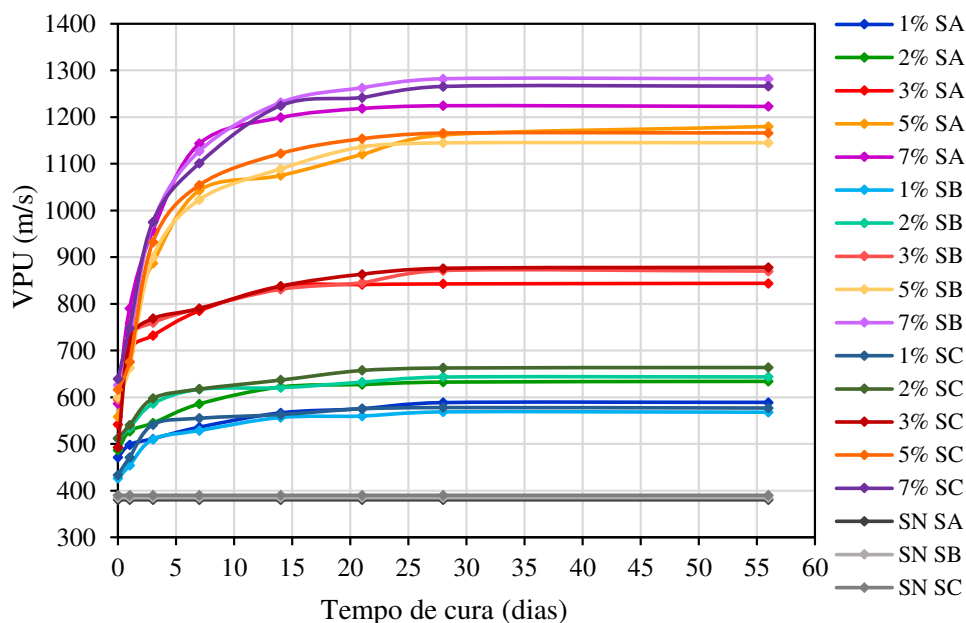


Figura 15: Variação da VPU com o teor de cimento e tempo de cura

Através da Figura 15, é possível observar que foram registradas diferentes velocidades de propagação do pulso ultrassônico nos corpos de prova de solo natural e solo com diferentes percentuais de adição de cimento, sendo os valores de VPU superiores para as misturas solo-cimento em todas as condições avaliadas.

Yesiller *et al.* (2000), em seus estudos sobre o uso da técnica ultrassônica para a determinação dos parâmetros de compactação de solos argilosos, constataram um aumento da VPU com a redução da plasticidade e do percentual de fração argila no solo. Na presente pesquisa, constatações similares foram obtidas. A relação entre valores de plasticidade e percentual de cimento, apresentada na Figura 13, permite constatar que o aumento do percentual de cimento adicionado à mistura implicou em redução da plasticidade. Ao analisar-se a Figura 15, é possível perceber que quanto maior o teor de cimento adicionado ao solo maior é o valor de VPU obtido, o que permite inferir uma relação de aumento na VPU vinculado a uma redução da plasticidade da mistura de solo com cimento.

No que se refere à granulometria, Sarro *et al.* (2021) verificaram uma sensibilidade do pulso ultrassônico à variação do arranjo granulométrico, havendo uma interferência direta do tamanho dos grãos. Considerando que, na presença de água, as partículas de argila e cimento reagem formando grandes aglomerados, é razoável supor que essa mudança no tamanho dos grãos interferirá na propagação da onda ultrassônica. No entanto, não se pode negligenciar o fato de que, a partir da reação do cimento com a argila, um gel de cimento é formado entre macroporos e microporos, levando a um aumento do tamanho das partículas das amostras de

solo cimentadas (Horpibulsuk *et al.*, 2009; 2010). Portanto, em uma tentativa de entender melhor o efeito das mudanças na distribuição do tamanho das partículas na VPU, foi desenvolvida uma proposta de correlação, considerando os resultados de granulometria e da VPU de misturas de solo-cimento com diferentes teores de cimento, mas com a mesma idade de cura (7 dias).

A Figura 16 mostra os resultados obtidos nas análises de granulometria e as variações nos valores de VPU devidas às adições de cimento. Modelos de regressão exponencial foram empregados para ajustar os dados experimentais dos valores de VPU e os valores de porcentagem de partículas de argila ($\phi < 0,002$ mm) ou de areia ($0,06$ mm $< \phi < 2$ mm), obtidos de acordo com os dados de distribuição granulométrica do solo natural e das misturas de solo-cimento (Figura 12) e classificados de acordo com os critérios do M.I.T. para distribuição granulométrica (Casagrande, 1948).

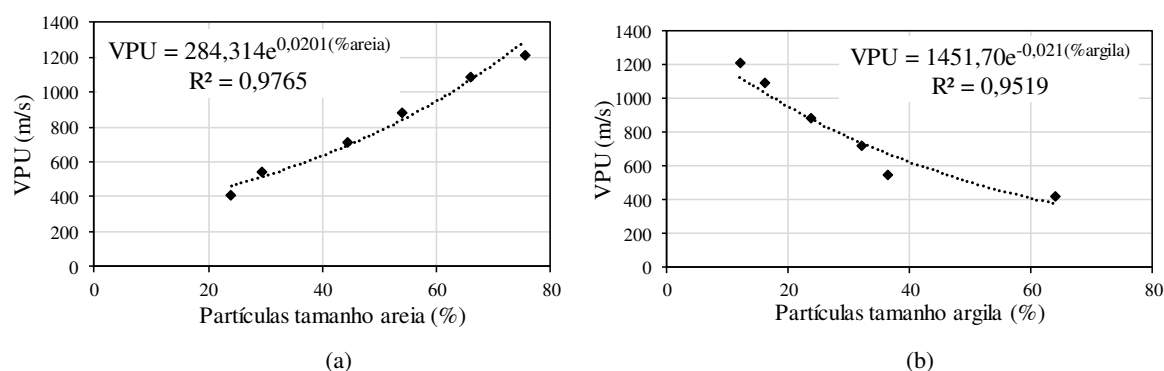


Figura 16: Variação de VPU considerando as variáveis: (a) % partículas tamanho areia; (b) % partículas tamanho argila.

Os resultados indicaram boas correlações entre os dados experimentais de granulometria e os valores de VPU, sendo possível observar uma clara tendência de aumento nos valores de VPU com o aumento do percentual de partículas de tamanho areia (ou com a redução do percentual de partículas de tamanho argila), resultante das reações de floculação recorrentes nas misturas de solo argiloso com cimento.

A explicação para tais resultados está nas diferenças de caminhos para propagação da onda longitudinal proporcionadas por diferentes arranjos e proporções de partículas. Segundo Ye *et al.* (2004), um maior volume de sólidos e uma menor porosidade resultam em maiores valores de VPU por proporcionar um meio sólido para a propagação da onda ultrassônica. Assim, as adições de cimento, ao promoverem a aglutinação das partículas finas do solo, gerando agregações com dimensões maiores, produziram um aumento no volume do meio sólido, vinculado a uma redução do índice de porosidade total do solo devida ao aumento da

quantidade de partículas de areia e redução das partículas de argila, proporcionando um meio com condições de propagação mais rápida para a onda ultrassônica.

Analisando-se os resultados da Figura 15 com base na interpretação da curva de variação volumétrica versus teor de cimento (Figura 14), é possível perceber uma relação entre o aumento nos valores da VPU e a posição dos teores de cimento em relação ao ponto de satisfação da curva. Quanto maior a distância do ponto de satisfação da curva, menor o percentual de incremento promovido pela cimentação na VPU. Os menores teores (1%, 2% e 3%) que produzem misturas de solo melhorado com cimento apresentaram valores de VPU menores que os correspondentes às misturas com teores mais próximos (5%) ao ponto de satisfação (7%) e ao próprio teor no qual a satisfação é obtida, teor para o qual tem-se a condição de solo estabilizado com cimento e o maior valor de VPU observado.

Na Figura 17, apresenta-se uma correlação obtida pela regressão dos dados de variação volumétrica obtida (ΔV) em função do teor de cimento testado no Método Físico-Químico e os valores de VPU de cada teor avaliado.

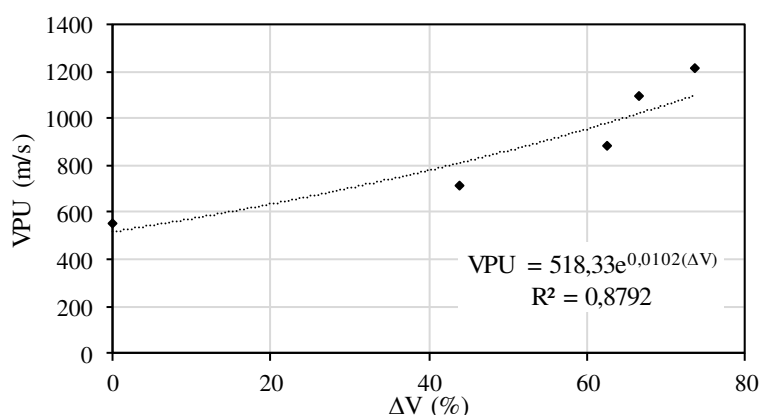


Figura 17: Variação da VPU considerando a variação volumétrica (ΔV) decorrente das mudanças físico-químicas

Os resultados encontrados indicam uma boa correlação ($R^2 = 0,8792$) entre os dados experimentais de VPU e as variações volumétricas (ΔV) obtidas para os teores avaliados, sendo possível correlacionar maiores valores de VPU a maiores variações volumétricas devidas às maiores alterações físico-químicas sofridas pelo sistema solo-cimento até o ponto de satisfação.

Miturski *et al.* (2021) afirmam que o aumento da VPU, à medida que a quantidade de aglomerante nos solos aumenta, deve-se ao efeito aglutinante das ligações produzidas entre as partículas da matriz fabricada. Ye *et al.* (2004) afirmam que um aumento de elementos sólidos conectados permite que o pulso ultrassônico se propague de forma mais rápida através de mais ligações de volumes sólidos e que fatores, como bolhas de ar, causam reflexo da onda ultrassônica e fazem com que seja fortemente atenuada.

Assim, o cimento, que é um material aglutinante, produz ligações entre os grãos do solo a partir de reações químicas que são mais intensificadas com o incremento do percentual de cimento adicionado e disponível para reagir. Como consequência, tem-se um aumento na conectividade das partículas sólidas do solo que permite um aumento na VPU. Os resultados obtidos pelas análises microestruturais (Figura 10) evidenciam essas observações. Conforme já constatado por outros autores, como Luong *et al.* (2014) e Chen *et al.* (2016), alterações na micromorfologia interferem na forma como é dada a propagação do pulso ultrassônico, influenciando na sua absorção e espalhamento.

Nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 10), percebe-se a influência da cimentação nas alterações micromorfológicas, sendo observada uma tendência de redução no tamanho dos poros e um conseqüente aumento dos contatos entre partículas. Maiores percentuais de cimento adotados implicam em alteração morfológica mais significativa da estrutura dos corpos de prova. Na imagem da microestrutura do corpo de prova de solo natural, visualmente se observam poros maiores (Figura 10a) que aqueles identificados nas imagens das microestruturas com cimento.

Por exemplo, na imagem da microestrutura com 7% de cimento (Figura 10f), percebe-se a existência de poros bem menores e contatos evidentes entre as partículas, mostrando uma maior conectividade do meio sólido. Assim, as ondas emitidas nestas estruturas conseguem se propagar com velocidades superiores àquelas da estrutura de solo natural, onde as bolhas de ar presentes nos poros maiores atenuam a propagação da onda. Essa tendência de maior valor de VPU com maior teor de cimento também foi observada por Alkiki *et al.* (2021). Segundo os autores, os compostos de cimentação e o cimento que não reage ajudam a preencher os vazios entre as partículas do solo, resultando na criação de outros caminhos com tempos de percurso mais curtos para a propagação das ondas ultrassônicas.

Os resultados apresentados na Figura 15 permitem ainda analisar o efeito do tempo de cura nos valores da VPU, demonstrando a eficiência da técnica ultrassônica na mensuração da evolução das ligações cimentícias, indicando ganhos mais significativos nos 3 primeiros dias de cura e ocorrência de ganhos menores, tendendo a uma estabilização, após 7 dias de cura, tendo-se pequenos incrementos até 28 dias de cura.

Essa tendência de aumento da VPU com o tempo de cura e com aumento do teor de cimento também foi observada em outros estudos com diferentes solos (Fatahi *et al.*, 2013; Mandal *et al.*, 2016; Vinoth *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2022).

O aumento da VPU com o tempo de cura pode ser associado com o processo de hidratação do cimento, conforme já constatado por diversos pesquisadores que descreveram o

comportamento de propagação da onda ultrassônica com o desenvolvimento da hidratação do cimento em concretos (Ye *et al.*, 2004; Yim *et al.*, 2016; Yoo *et al.*, 2016; Bressan, 2019; Carniel, 2021). A seguir, apresenta-se uma analogia dessa descrição do comportamento com o desenvolvimento das reações de hidratação para os resultados desta pesquisa, na qual o material trabalhado foi um solo argiloso, e não um concreto, fazendo-se as adequações pertinentes ao material estudado.

No estágio inicial, no qual os corpos de prova estão recém moldados e ainda não ocorreram as reações de hidratação do cimento, existe uma condição similar à do solo natural, com partículas espaçadas, onde ocorrem poros de tamanhos maiores (Figura 10a) e um elevado percentual de partículas de tamanho argila [Figuras 12 e 16(b)] que contribuem para uma maior porosidade total. Dessa forma, prevalecem condições de baixa conectividade de caminhos sólidos, favorecendo a presença de grandes quantidades de bolhas de ar localizadas nos poros maiores, que agem como atenuantes da propagação da onda.

No segundo estágio, observam-se aumentos expressivos nos valores de VPU até a idade de 7 dias de cura, ligados às reações de hidratação do cimento que promovem a ligação entre as partículas do solo, reduzindo o espaçamento entre elas, e a aglutinação de partículas menores, originando partículas maiores [Figuras 12 e 16(a)]. Dessa forma, ocorre o fechamento de caminhos distorcidos promovido pelas partículas hidratadas, implicando em uma redução dos macroporos e no surgimento de maior quantidade de microporos, favorecendo a propagação das ondas por um caminho interconectado sólido mais curto.

No estágio final, dada a alta reatividade inicial do cimento, presume-se que as reações iniciais de hidratação já ocorreram, que as reações entre a cal gerada na hidratação do cimento e os argilominerais do solo em grande parte já se desenvolveram e que já foram estabelecidas as ligações e as alterações nas partículas e na micromorfologia necessárias para produzir um caminho que permita uma propagação mais rápida das ondas ultrassônicas. Ainda se observam pequenos incrementos na VPU devidos às reações pozolânicas, mas com tendência à estabilização que ocorre totalmente após 28 dias, não sendo observados novos incrementos após essa idade até 56 dias de cura.

No que se refere ao efeito do tamanho do corpo de prova empregado para essas análises, é possível constatar, através das curvas de todos os teores de cimento testados (Figura 15) em todas as idades de cura avaliadas, que as dimensões de corpo de prova testadas não interferiram na análise da evolução e aumento nos valores da VPU devidos à cimentação, sendo pequenas as variações observadas. Dessa forma, é possível associar os valores obtidos para a VPU como um parâmetro associado ao teor de cimento e idade de cura e não associado ao comprimento

disponível para a propagação da onda (a altura dos corpos de prova), considerando-se o intervalo de 20 mm a 127 mm, o que reforça a viabilidade de associá-lo a parâmetros mecânicos obtidos através de ensaios convencionais com corpos de prova de dimensões distintas.

3.4 Análise da técnica ultrassônica associada aos parâmetros MR e RCS

Para o estudo do efeito da cimentação artificial na rigidez resiliente e na resistência à compressão, foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Compressão Simples, respectivamente. Na Figuras 18 e 19, são apresentados, respectivamente, os valores médios de MR e RCS para as condições de solo natural (SN) e com os distintos teores de cimento testados (SC).

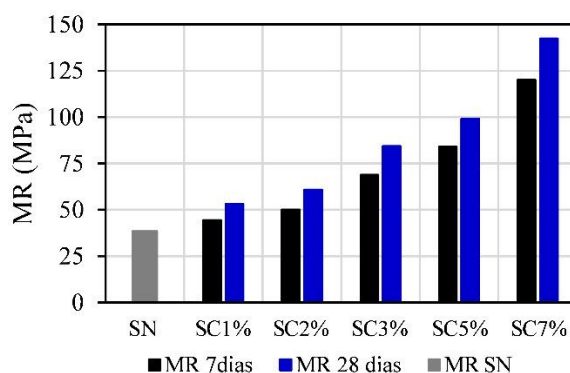


Figura 18: MR nas condições de solo natural e de misturas de solo com cimento

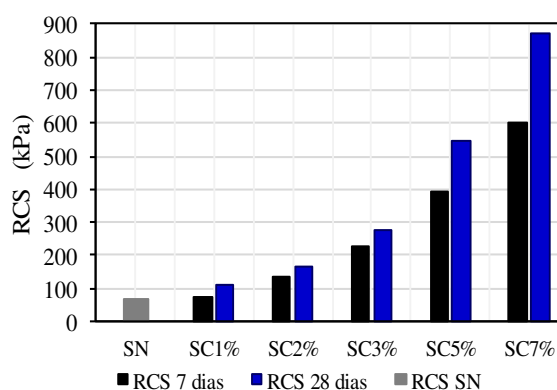


Figura 19: RCS nas condições de solo natural e de misturas de solo com cimento

Através da análise dos resultados das Figuras 18 e 19, é possível observar um aumento nos valores de MR e RCS devido à adição da cimentação artificial no solo. De acordo com Croft (1967), as composições química e mineralógica do solo condicionam o sucesso de sua interação com o cimento. Através dos resultados de caracterização do solo residual tropical adotado, obtidos por FRX (Tabela 1) e por DRX (Figura 1), este foi considerado como caulínico, conforme observado por Lopes *et al.* (2019). Segundo Venson (2015), solos

cauliníticos tendem a apresentar um desenvolvimento de resistência e rigidez com pequenas quantidades de cimento.

Neste contexto, mesmo com os baixos percentuais de cimento adotados, são esperados ganhos de rigidez e resistência à compressão, conforme foi observado através dos incrementos nos valores de MR e RCS (Figuras 18 e 19, respectivamente) dos corpos de prova compactados de misturas de solo com cimento em relação aos de solo natural, em todos os teores testados. Esse resultado é proveniente das reações entre solo e cimento e das subsequentes alterações promovidas na granulometria e estrutura do solo (Figuras 10, 12, 14 e 15).

Segundo Consoli *et al.* (2007), os ganhos mecânicos devidos à cimentação artificial estão relacionados com o aumento do número de contatos entre as partículas. Dessa forma, as alterações microestruturais já discutidas e observadas nas imagens do MEV (Figura 10), nas quais é possível observar uma redução no tamanho dos poros e uma redução das distâncias entre as partículas devida às ligações cimentícias, são responsáveis pelos ganhos de rigidez resiliente e resistência à compressão simples.

O aumento da RCS com o teor de cimento e o tempo de cura também pode ser explicado pela ocorrência de hidratação do cimento e reações pozolânicas entre o solo e os compostos cimentícios. Alkiki *et al.* (2021) explicam que os compostos cimentícios produzidos por reações pozolânicas aumentam a força de ligação entre os aglomerados e preenchem o espaço poroso entre as partículas do solo. Embora um tipo diferente de solo tenha sido usado em sua pesquisa, os autores também relataram que a RCS aumentou com os aumentos do teor de cimento e do tempo de cura. Durante a adição de cimento, as partículas planas e lisas do solo se desintegram em porções ásperas e esfareladas, e esse comportamento melhora a coesão entre as partículas e aumenta a resistência mecânica do material. Portanto, esse mecanismo também pode explicar os aumentos de RCS observados neste estudo. Vários estudos envolvendo a adição de cimento em uma variedade de solos também relataram a tendência de aumento da RCS com os aumentos da dosagem de cimento e do período de cura (Chew *et al.*, 2004; Consoli *et al.*, 2010; Sharma *et al.*, 2018; Ranaivomanana *et al.*, 2018; Sahlabadi *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2022).

O mesmo comportamento foi observado nos ensaios de MR. A Figura 18 mostra um aumento nos valores de MR devido aos aumentos do teor de cimento e do tempo de cura. Resultados semelhantes foram obtidos anteriormente para vários tipos de solos (Lofti; Witczak, 1985; Achampong *et al.*, 1997; Puppala *et al.*, 2003; Venson, 2015; Festugato *et al.*, 2021).

Para Puppala *et al.* (2003), as melhorias de MR observadas em um solo argiloso submetido à cimentação artificial podem estar relacionadas às reações de troca iônica e à floculação, além do desenvolvimento de reações de cimentação e pozolânicas. Todos esses

mecanismos uniram as partículas do solo nos pontos de contato e aumentaram a rigidez dos corpos de prova. As conclusões desses autores estão de acordo com as explicações apresentadas nesta pesquisa para as melhorias no MR.

As Figuras 18 e 19 indicam aumento expressivo nos parâmetros de RCS e MR de 0 a 7 dias e um pequeno incremento de 7 a 28 dias de cura. Esses resultados eram esperados em vista do fato de ter sido utilizado um cimento Portland de alta resistência inicial e terem sido observadas evidências de reações pozolânicas indicadas através da diminuição do pH de 7 dias para 28 dias (Figura 9). Os incrementos observados nos parâmetros também podem ser analisados com base em duas zonas definidas na classificação apresentada por Horpibulsuk (2012). De acordo com o autor, os pontos de contato do cimento por grão aumentam à medida que o teor de cimento aumenta. Após o processo de endurecimento, uma quantidade proporcional de ligações cimentícias surge nos pontos de contato. Isso é chamado de zona ativa e se refere ao período de cura caracterizado por maiores ganhos de resistência. Além dessa zona, o desenvolvimento da resistência é menos expressivo, embora ainda aumente gradualmente. Esse estágio foi classificado por Horpibulsuk (2012) como uma zona inerte.

Embora essas explicações tenham se concentrado no ganho de resistência e possam ser aplicadas diretamente aos resultados do RCS, elas podem ser correlacionadas com os resultados de MR. Considerando que as melhorias na resistência podem estar relacionadas a um comportamento frágil das misturas, elas causam um aumento na rigidez e, conseqüentemente, um aumento no MR.

Bortolotto (2017) afirma que o número de contatos das partículas é um fator que afeta significativamente a rigidez, pois as partículas podem ser unidas por ligações cimentícias. Krautkraemer e Krautkraemer (2013) argumentam que a VPU de um material é fortemente afetada por sua rigidez. De acordo com Bortolotto (2017), o tempo necessário para a onda ultrassônica percorrer o material depende principalmente de sua densidade e rigidez.

Nessa linha, é possível associar os ganhos de rigidez decorrentes do processo de cimentação às mudanças microestruturais resultantes das interconexões entre os volumes sólidos por meio das ligações cimentícias e dos produtos de hidratação do cimento que gradualmente preenchem os vazios durante as reações cimentícias, aumentando os contatos entre as partículas (Bortolotto, 2017). Nesta pesquisa, foi possível inferir que o aumento da rigidez resultou em maior rigidez sob a aplicação de cargas cíclicas (maior MR) e proporcionou a estruturação de um meio que permite a propagação mais rápida das ondas ultrassônicas (maior VPU).

Para investigar uma possível correlação entre MR e VPU ou entre RCS e VPU, o conjunto de dados foi submetido a análises de regressão. Os modelos lineares proporcionaram o melhor ajuste ao conjunto de dados experimentais (Figura 20).

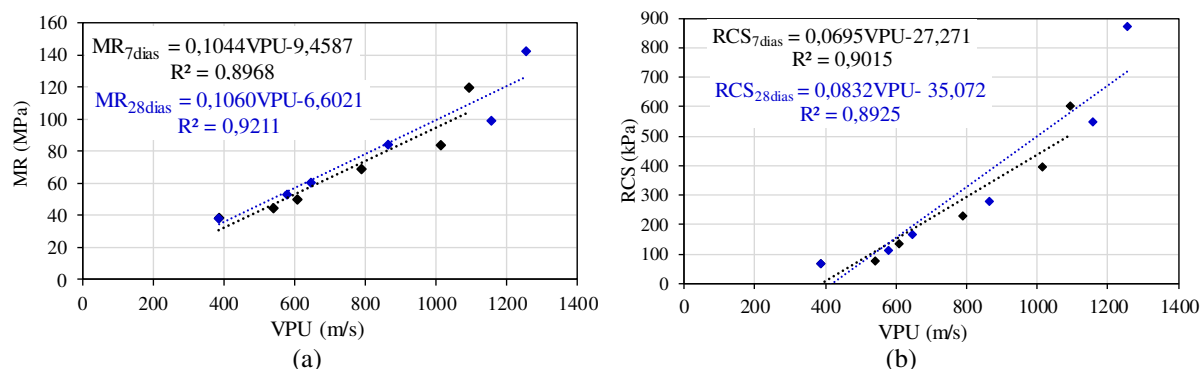


Figura 20: Correlações entre diferentes propriedades mecânicas das misturas solo e cimento: (a) VPU e MR; (b) VPU e RCS.

Os resultados da Figura 20(a) indicaram uma boa correlação entre os resultados de MR e VPU para os períodos de cura de 7 dias ($R^2 = 0,8968$) e 28 dias ($R^2 = 0,9211$). Verificou-se que os valores de MR são diretamente proporcionais aos valores de VPU. Assim, é possível considerar a possibilidade de avaliar a rigidez dos materiais (nesse caso, misturas de solo-cimento) com base em uma técnica prática e não destrutiva, como a técnica ultrassônica. Nessa análise, a VPU seria um parâmetro direcional que pode fornecer uma estimativa preliminar do comportamento mecânico do material quando ele for submetido ao ensaio de MR.

Na Figura 20(b), foi observada uma boa correlação entre os resultados de RCS e VPU para as misturas testadas após períodos de cura de 7 dias ($R^2 = 0,9015$) e 28 dias ($0,8925$). Os valores de RCS se mostraram diretamente proporcionais aos valores de VPU. Portanto, também é possível empregar a VPU como um parâmetro preliminar para estimar variações na resistência à compressão de misturas de solo-cimento. Os resultados de ensaios ultrassônicos utilizados para a determinação da VPU em pesquisas anteriores também sugeriram que as tendências comportamentais do parâmetro RCS foram confirmadas principalmente pelo desempenho observado através da VPU (Gullu; Agha, 2021).

Para entender melhor a relação entre RCS, MR e VPU, foram estabelecidas suas correlações com o teor de cimento e realizado um comparativo dos percentuais de incremento observados em cada um dos parâmetros. A Figura 21 expõe as relações entre teor de cimento (%) e os resultados dos ensaios de RCS, MR e VPU realizados em corpos de prova submetidos a 7 e 28 dias de cura. A Figura 22 apresenta os incrementos percentuais verificados nesses diferentes ensaios, em função dos aumentos do teor de cimento e do tempo de cura. Os

resultados obtidos para o solo natural foram usados como valores de referência para calcular o percentual de incremento (%) devido à adição de cimento. Nas análises dos dados de VPU, foram considerados os valores médios dos resultados obtidos de corpos de prova de diferentes dimensões.

Segundo os resultados da Figura 21, os modelos de regressão linear proporcionaram um bom ajuste a todos os conjuntos de dados experimentais. O menor $R^2 = 0,9654$ foi obtido na análise dos dados de VPU, para um tempo de cura de 7 dias. O R^2 mais elevado ($R^2 = 0,9770$) foi obtido a partir da análise dos dados de MR, para um tempo de cura de 28 dias. Esses resultados demonstraram que mesmo o R^2 mais baixo apresentou um valor elevado, indicando uma boa correlação entre os dados de forma geral. Além disso, a diferença entre os valores mais baixos e mais altos de R^2 não foi muito significativa.

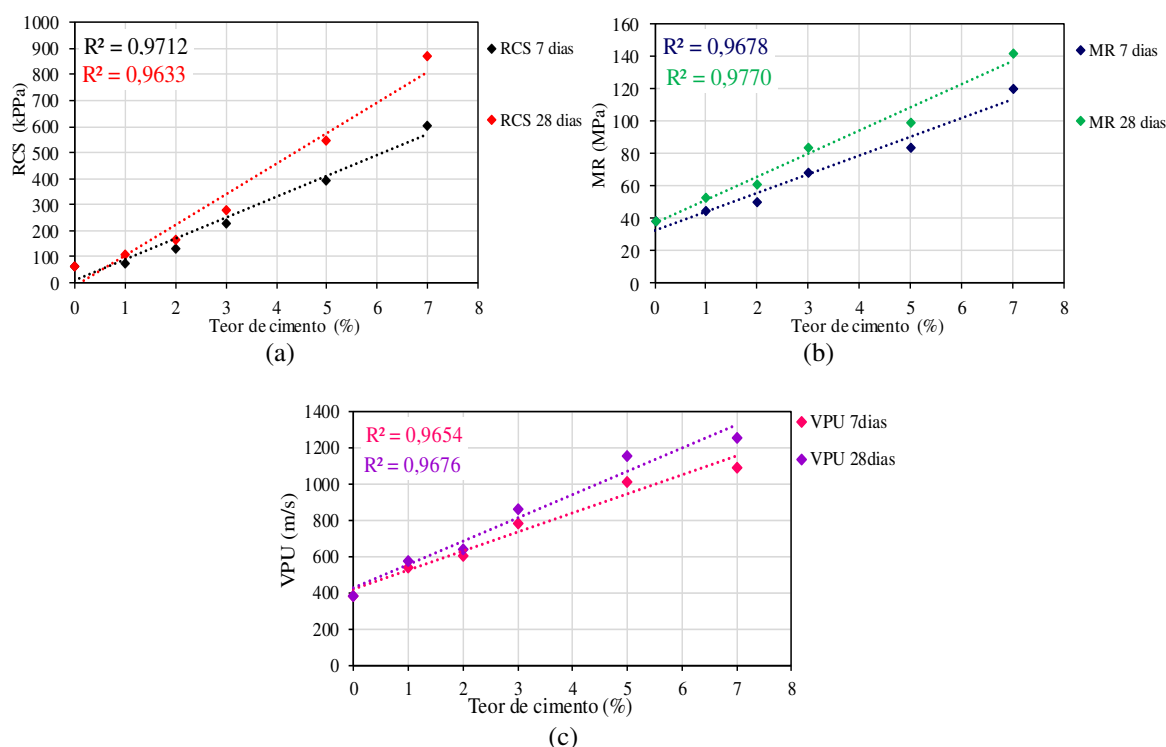


Figura 21: Correlações entre teor de cimento e diferentes propriedades: (a) RCS; (b) MR; (c) VPU.

As análises dos resultados sugerem que RCS, MR e VPU apresentaram comportamentos semelhantes quanto ao incremento no percentual de cimento adicionado. Dessa forma, todos os parâmetros avaliados indicam uma tendência de aumento praticamente linear com o aumento da quantidade de cimento adicionada ao solo argiloso. É importante ressaltar que essa possível tendência foi observada para ambos os tempos de cura (7 e 28 dias). A tendência comportamental de um incremento praticamente linear da RCS com o teor de cimento também

foi relatada anteriormente por vários pesquisadores (Consoli *et al.*, 2007; Pakbaz; Alipor, 2012; Chenari *et al.*, 2018; Alkiki *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2022).

No que se refere à compreensão dos resultados observados, os princípios que neste estudo explicam o incremento da RCS são muito semelhantes aos que explicam o aumento do MR e da VPU. Portanto, é razoável identificar uma tendência de incremento praticamente linear com o teor de cimento também para os parâmetros de MR e VPU. Além disso, estudos anteriores mostraram que a RCS é um índice que tem uma forte relação positiva com a rigidez e a resistência (Sahlabadi *et al.*, 2021).

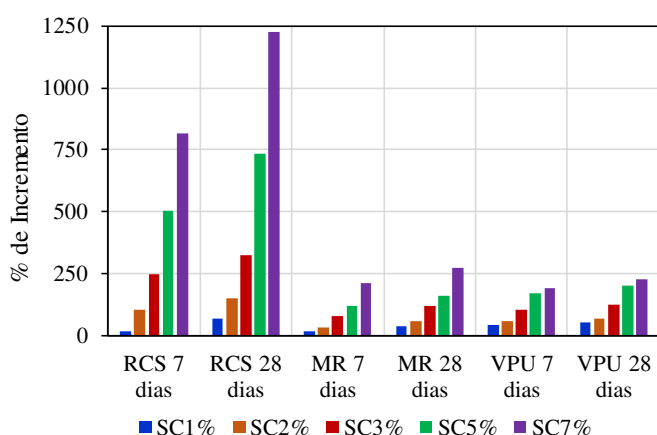


Figura 22: Percentual de incremento devido às variações no teor de cimento e no tempo de cura

Os resultados ilustrados na Figura 22 mostram claramente que os aumentos percentuais proporcionados pelos aumentos do teor de cimento e do tempo de cura foram diferentes para cada ensaio realizado nesta pesquisa. Considerando que esses diferentes ensaios têm procedimentos e critérios distintos, essas diferenças são esperadas. De forma geral, os resultados indicaram um maior incremento percentual nos resultados de RCS, para todas as condições de cimentação avaliada. O aumento percentual máximo no RCS (proporcionado pelo teor de cimento de 7%) foi 4,5 vezes maior do que os verificados nos resultados de MR e VPU para misturas produzidas com teor de cimento igual a 7%.

É interessante observar que os incrementos percentuais obtidos nos resultados de MR e VPU se mostraram muito semelhantes, para as condições investigadas neste estudo. Embora tenham sido observados incrementos relativamente menores para o MR, os resultados dos ensaios de MR e VPU foram, em geral, próximos uns dos outros, especialmente para o tempo de cura de 28 dias.

4 CONCLUSÕES

Com base no programa experimental adotado para o estudo do efeito da adição do cimento CPV-ARI ao solo tropical residual argiloso investigado por meio da técnica ultrassônica, considerando-se as particularidades desta pesquisa, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. A mistura do cimento ao solo argiloso promoveu o deslocamento da curva granulométrica para frações grossas e alterações micromorfológicas que indicaram um aumento no contato entre as partículas, sendo esses fatores responsáveis por proporcionar um caminho sólido interconectado por ligações cimentícias que permitiu uma propagação mais veloz da onda ultrassônica. Para o maior teor de cimento (7%) no maior tempo de cura testado (56 dias), a VPU foi 3,3 vezes maior do que a do solo natural compactado com os mesmos parâmetros de moldagem;
2. Para os materiais adotados nesta pesquisa, a técnica de DRX, que se mostrou eficaz na identificação dos picos expressivos de alita, componente esperado em elevada concentração para cimentos CPV-ARI, permitiu classificar o solo adotado como caulinítico e não se mostrou eficiente para a identificação dos produtos de hidratação do cimento. A ocorrência das reações de hidratação do cimento foi constatada através de um teste rápido envolvendo a aspersão de fenolftaleína e medidas dos valores de pH das misturas que evidenciaram o aumento de pH com a alteração do meio ácido do solo natural para básico com as adições de cimento;
3. O aumento no percentual de cimento promoveu ganhos de rigidez e resistência à compressão constatados através de incrementos na VPU, no MR e na RCS, sendo tais parâmetros maiores quanto maior o acréscimo de cimento ao solo. Os incrementos de VPU, MR e RCS com o teor de cimento apresentaram a mesma tendência de aumento aproximadamente linear, com fortes correlações em ambos os tempos de cura analisados, variando de $R^2 = 0,9654$ a $R^2 = 0,9770$. As porcentagens de incremento devido à adição de cimento foram, no geral, mais próximas para MR e VPU e significativamente mais elevadas para RCS, atingindo o valor mais alto para 7% de teor de cimento aos 28 dias, com uma média 5 vezes maior do que MR e VPU;
4. A técnica do pulso ultrassônico se mostrou eficaz para a constatação das alterações de rigidez promovidas pela adição de cimentação artificial ao solo argiloso, se mostrando

- eficiente para constatar as diferenças de rigidez e resistência à compressão promovidas pelas variações de percentual de cimento e de tempo de cura;
5. Para os corpos de prova investigados, as dimensões não se mostraram fator de alteração significativa nos valores de VPU para todos os teores e tempos de cura avaliados, considerando o intervalo de variação de altura de 20 mm a 127 mm;
 6. Os resultados indicaram uma boa correlação entre os dados experimentais de MR e VPU e de RCS e VPU, para os tempos de cura de 7 ($R^2 = 0,8968$) e 28 ($R^2 = 0,9211$) dias, sendo o modelo linear o que se mostrou mais adequado para a regressão dos dados obtidos;
 7. A boa correlação entre dados de MR e VPU aponta para a possibilidade técnica de se utilizar a VPU como parâmetro preliminar de estimativa da rigidez que pode ser esperada de uma mistura de solo com cimento que for submetida ao ensaio de MR;
 8. Os dados de RCS e VPU também apresentaram uma boa correlação, com $R^2 = 0,9015$ e $R^2 = 0,8925$, para os resultados com tempo de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Tais resultados indicam a possibilidade de avaliação prévia do efeito da variação do percentual da cimentação na resistência à compressão para misturas de solo com cimento, previamente à execução do processo usual de dosagem. Entretanto, é válido ressaltar que o incremento percentual devido à adição de cimento na VPU foi consideravelmente menor do que o incremento observado na RCS para os mesmos teor de cimento e tempo de cura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 307-99. **Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials**. AASHTO. 2017.

ACHAMPONG, F.; USMEN, M.; KAGAWA, T. **Evaluation of resilient modulus for lime and cement-stabilized synthetic cohesive soils**. Transportation Research Record 1589, TRB, 971077, p.70-75, Wayne State University, Detroit, Michigan. 1997.

ADEM, H.H.; VANAPALLI, S.K. **Prediction of the modulus of elasticity of compacted unsaturated expansive soils**. International Journal of Geotechnical Engineering, v.9, n.2, p.163-175. 2015.

ALKIKI, I.M.; ABDULNAFAA, M.D.; ALDAOOD, A. **Geotechnical and other characteristics of cement-treated low plasticity clay**. Soils and Rocks, v.44, n.1, p.1-10. 2021.

AL-RAWAS, A.A.; HAGO, A.W.; AL-SARMI, H. **Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman**. Building and Environment, v.40, n.5, p.681-687. 2005.

ARMAN, H.; PARAMBAN, S. **Dimensional effects on dynamic properties and the relationships between ultrasonic pulse velocity and physical properties of rock under various environmental conditions.** Geotechnical and Geological Engineering, v.39, p.3947-3957. 2021.

ARSHAD, M. **Development of a Correlation between the Resilient Modulus and CBR Value for Granular Blends Containing Natural Aggregates and RAP/RCA Materials.** Advances in Materials Science and Engineering. v.1, p.1-16. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75mm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 12025 – MB 3361. Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, Brasil., 2012.

ASTM **D2487-17** Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2017a.

ASTM **D4318-17e1** Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2017b.

ASTM **D1633-00** Standard test method for compressive strength of molded soil-cement cylinders. Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2017c.

ASTM **D698-12** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2021a.

ASTM **D7928-21e1** Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2021b.

ASTM **D854-14** Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. Annual book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA. 2014.

AVERSA, S.; EVANGELISTA, A.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, A. **Some aspects of the mechanical behaviour of structured soils and soft rocks**. In: International Symposium On Geotechnical Engineering of hard soils – soft rocks. Athens. 1993.

BAGHBANI, A.; ABUEL-NAGA, H.; FARADONBEH, R.S.; COSTA, S.; ALMASOUDI, R. **Ultrasonic characterization of compacted salty kaolin-sand mixtures under nearly zero vertical stress using experimental study and machine learning**. Geotechnical and Geological Engineering, v.41, p.2987-3012. 2023.

BASSO, R.V.; FERRAZ, R.L.; BELINCANTA, A.; RAMOS, F.S. **Aplicação do método físico-químico de dosagem de misturas solo-cimento aos solos típicos no noroeste do Paraná**. IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, ENTECA, Brasil. 2003.

BORTOLOTTO, M.S. **Bender Elements, Ultrasonic Pulse Velocity, and Local Gauges for the Analysis of Stiffness Degradation of an Artificially Cemented Soil**. Dissertation, Federal University of Rio Grande do Sul. 2017.

BRESSAN, H.F.G. **Study of the behaviour of ultrasonic waves in monitoring concrete at early ages**. Dissertation, Federal University of Santa Catarina. 2019.

CAPUTO, H.P. (2015) **Mecânica dos Solos – Teoria e Aplicações**. LTC, Brasil. 2015.

CARNIEL, A.J.Z. **Evaluation of the sensitivity of diffuse ultrasound parameters in the characterization of concrete mixtures**. Dissertation, Federal University of Santa Catarina. 2021.

CHADDA, L.R. **A rapid method of assessing the cement requirement for the stabilization of soils**. Indian Concrete Journal, v.45, n.7, p.298-314. 1971.

CHAMPIRÉ, F.; FABBRI, A.; MOREL, J.C.; WONG, H.; MCGREGOR, F. **Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material**. Construction and Building Materials, v.110, p.70-78. 2016.

CHAN, C.M.; CH'NG, S.S. **Preliminary study of S-Wave velocity and unconfined compressive strength of cement-palf stabilized kaolin**. International Journal of Integrated Engineering (Issue of Civil and Environmental Engineering). 2011.

CHEN, J.; WANG, H.; YAO, Y. **Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction**. Ultrasonics, v.69, p.19-24. 2016.

CHEN, Y.; UCHIMURA, T.; IRFAN, M.; HUANG, D.; XIE, J. **Detection of water infiltration and deformation of unsaturated soils by elastic wave velocity**. Landslides, v.14, n.5, p.1715-1730. 2017.

CHENARI, R.J.; FATAHI, B.; GHORBANI, A.; ALAMOTI, M.N. **Evaluation of strength properties of cement stabilized sand mixed with EPS beads and fly ash.** Geomechanics and Engineering, v.14, n.6, p.533-544. 2018.

CHEW, S.H.; KAMRUZZAMAN, A.H.M.; LEE, F.H. **Physicochemical and Engineering behavior of cement treated clays.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.130, n.7, p.696-706. 2004.

CHOU, Y.T. **Soil stabilization.** In: Engineering behavior of pavement materials: State of-the-art. s. 1., Final Report Army Engineer Water-ways Experiment Station, Soils and Pavement Laboratory. 1977.

CHRIST M, PARK JB. **Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils.** Cold Regions Science and Technology, v.58, n.3, 136-142. 2009.

CHRYSOCHOU, M. **Investigation of the mineral dissolution rate and strength development in stabilized soils using quantitative X-ray diffraction.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 26, n.2, p.288–295. 2014.

CONSOLI, N.C.; CRUZ, R.C.; FONSECA, A.V.; COOP, M.R. **Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v.138, n.1, p.100-109. 2012.

CONSOLI, N.C.; CRUZ, R.C.; FLOSS, M.F.; FESTUGATO, L. **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, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K.S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.133, n.2, p.419-436. 2007.

CROFT, J.B. **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization.** Geotechnique, v.17, p.119-135. 1967.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER CLA 259. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, Brasil. 1996

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT ME 134. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT ME 414. Pavimentação – Solo-Cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento.** Rio de Janeiro, Brasil. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT IS 247. Instrução de Serviço – Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa.** Brasil. 2021.

DONGQING, L.I.; XING, H.; FENG, M.; YU, Z. **The Impact of Unfrozen Water Content on Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soils.** Procedia Engineering, v.143, p.1210-1217. 2016.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** EMBRAPA, Brasília. 2017.

FATAHI B, FATAHI B, LE TM, KHABBAZ H. **Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement.** Geosynthetics International, v.20, n.4, p.286-300. 2013.

FERREIRA, G.C.; DOS, S.; SARRO, W.S.; HOFFMANN, M.; GONÇALVES, R. **Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo cimento por ultrassom.** In: Proc. Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção - ConaEnd2014 - available in CD-ROM., Abendi, São Paulo, Brasil. 2014.

FERREIRA, J.W.S.; CASAGRANDE, M.D.T; TEIXEIRA. **Sample dimension effect on cement-stabilized sandy soil mechanical behavior.** Soils and Rocks. v.45, n.2, p.1-10. 2022.

FESTUGATO, L.; VENSON, G.I.; CONSOLI, N.C. **Parameters Controlling Cyclic behaviour of cement-treated sand.** Transportation Geotechnics. 2021.

FILHO, J.T.; TESSIER, D. **Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.22, n.6. 2009.

GULLU, H.; AGHA, A.A. **The rheological, fresh and strength effects of cold-bonded geopolymer made with metakaolin and slag for grouting.** Construction and Building Materials, v.274. 2021.

GULLU, H.; YETIM, M.E.; GULLU, E.B. **Effect of using nano-silica on the rheological, fresh and strength characteristics of cement-based grout for grouting columns.** Journal of Building Materials, v.76. 2023.

HORPIBULSUK, S. **Strength and Microstructure of cement stabilized clay.** Intech Open Book Series – Chapter 15. 2012.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; CHINKULKIJNIWAT, A.; RAKSACHON, Y.; SUDDEEPOONG, A. **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations.** Construction & Building Materials, v.24, n.10, p.2011-2021. 2010.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; RAKSACHON, Y. **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay.** Soil and Foundation, v.49, n.1, p.85-98. 2009.

IKHLEF, N.S.; GHEMBAZA, M.S.; DADOUCH, M. **Effect of cement and compaction on the physicochemical behavior of a material in the region of Sidi Bel Abbes**. Engineering Technology & Applied Science Research, v.40, n.4, p.677-680. 2014

JING, P.; SONG, X.; ZHANG, J.; NOWAMOOZ, H. **A review of hydro-mechanical coupling behaviour of cement-treated materials**. Construction and Building Materials, v.322. 2022.

KOLAY, E.; BASER, T. **Estimating of the dry unit weight of compacted soils using general linear model and multi-layer perceptron neural networks**. Applied Soft Computing, v.18, p.223–231. 2014.

KRAUTKRAEMER, J.; KRAUTKRAEMER, H. **Ultrasonic testing of materials**. Springer Science & Business Media. 2013.

KUTANAELI, S.S.; CHOBBASTI, A.J. **Effects of nanosilica particles and randomly distributed fibers on the ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of cemented sand**. Journal of Materials in Civil Engineering, v.29, n.3. 2016.

LOFTI, H.; WITCZAK, M.W. **Dynamic Characterization of Cement-Treated Base and Subbase Materials**. Transportation Research Record 1031, TRB, p.41–48, National Research Council, Washington, D.C. 1985.

LOPES, M.M.S.; ALVARENGA, R.D.C.S.S.A.; PEDROTI, L.G.; RIBEIRO, J.C.L.; DE CARVALHO, A.F.; CARDOSO, F.D.P.; MENDES, B.C. **Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints**. Construction and Building Materials, v.205, p.463-474. 2019.

LUONG, J.; DESTAIN, M.F.; MERCATORIS, B.C.N. **Characterization of structural properties of soil using ultrasonic waves**. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2014, v.6, p.4582-4593. 2014.

LYRA, B.I.; MONTEIRO, E.C.B. **Combate à ação sinérgica da carbonatação e do ataque por cloretos com adição de CBCA**. Brazilian Journal of Development, v.7 n.10, p.98352-98373. 2021.

MANDAL, T.; TINJUM, J.M; EDIL, T.B. **Non-destructive testing of cementitiously stabilized materials using ultrasonic pulse velocity test**. Transportation Geotechnics. 2016.

MENGUE, E.; MROUEH, H.; LANCELOT L.; MEDJO, E.R. **Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement**. Soil and Foundation, v.57, n.1, p.60-79. 2017.

MEYSAN, B. **Shear wave velocity in granular soil considering effects of inherent and stress-induced anisotropy**. Journal of Central South University, v.28, p.1476-1492. 2021.

MITCHELL, J.K.; EL JACK, S.A. **The fabric of Soil-Cement and its formation**. Clays and Clay Minerals, v.14, n.1, p.297-305. 1966.

MITURSKI, M.; SAS, W.; RADZEVICIUS, A.; SADZEVICIUS, R.; SKOMINAS, R.; STELMASZCZYK, M.; GLUCHOWSKI, A. **Effect of Dispersed Reinforcement on Ultrasonic pulse velocity in stabilized soil**. *Materials*, v.14, p.6951. 2021.

NALON, G.H.; RIBEIRO, J.C.L.; ARAÚJO, E.N.D.; PEDROTI, L.G.; CARVALHO, J.M.F.; SANTOS, R.F.; OLIVEIRA, D.S. **Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures**. *Construction and Building Materials*, v.275, p.122-123. 2021.

NELSON, J.D.; MILLER, D.J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**. John Wiley and Sons, New York. 1992.

NETO, W.R.V.; CARVALHO, C.J.; CAPUZZO, V.M.S. **Investigação Experimental do pH em Interfaces Solo-Concreto**. In: Geocentro 2019, Brasília, Brasil. 2019.

OH, W.T.; VANAPALLI, S.K. **Influence of Poisson's Ratio on the Stress vs. Settlement Behavior of Shallow Foundations in Unsaturated Fine-Grained Soils**. *Soils and Rocks*, v.39, n.1, p.71-79. 2016.

OUZIA, A.; SCRIVENER, K. **The needle model: A new model for the main hydration peak of alite**. *Cement and Concrete Research*, v.115, p.339–360. 2019.

PAKBAZ, M.S.; ALIPOUR, R. **Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay**. *Applied Clay Science*, p.67-68, p.1-4. 2012.

PUPPALA, A.J.; RAMAKRISHNA, A.M.; HOYOS, L.R. **Resilient Moduli of treated clays from repeated load triaxial test**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v.1821, n.1. 2023.

PEREIRA, T.T.C.; OLIVEIRA, F.S.; FREITAS, D.F.; DAMASCENO, B.D.; DIAS, A.C. **Mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo**. *Genomos*, v.28, n.1, p.1-14, 2020.

RABAB'AH, S.; HATTAMLEH, O.A.; ALDEEKY, H.; ALJARRAH, M.M.; AL_QABLAN, H.A. **Resilient Response and Permanent Strain of Subgrade Soil Stabilized with Byproduct Recycled Steel and Cementitious Materials**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.32, n.6, p.1-10. 2020.

RANAIVOMANANA, H.; RAZAKAMANANTSOA, A.; AMIRI, O. **Effects of Cement Treatment on Microstructural, Hydraulic, and Mechanical properties of compacted soils: Characterization and Modeling**. *International Journal of Geomechanics*, v.18, n.9. 2018.

RESENDE M., CURI N., REZENDE S.B., CORRÊA G.F., KER J.C. **Pedologia: base para disnção de ambientes**. Editora UFLA, Lavras, 378 pp. 2014.

SAHLABADI, S.H.; MEYSAM, B.; MOUSIVAND, M.; SAADAT, M. **Freeze-Thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.33, n.9. 2021.

SANBONSUGE, K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.; MOURA, E. **Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento.** Transportes, v.25, n.4, p.68-82. 2017.

SANTAMARINA, J.C.; KLEIN, K.; FAM, M. **Soils and waves.** Wiley, New York. 2001.

SARRO, W.S.; ASSIS, G.M.; FERREIRA, G.C.S. **Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil.** Construction and Building Materials, v.272, p.1-8. 2021.

SARRO, W.S.; FERREIRA, G.C.D.S.; GALLETTO, A. **Técnica de ultrassom aplicada na inspeção de edificações construídas em solo compactado.** In: Proc. 57° Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2015, IBRACON, Brasil. 2015

SARRO, W.S.; FERREIRA, G.C.S. **Soil elastic modulus determined by Ultrasound tests.** Soil and Rocks, v.42, n.2, p.117-126. 2019.

SASANIAN, S.; NEWSON, T.A. **Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays.** Soils and Foundations, v.54, n.2, p.209-224. 2014.

SELÇUK, L.; SEKER, V. **Predicting California bearing ratio of foundation soil using ultrasonic pulse velocity.** Proceedings of the institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, v.172, n.4, p.320-330. 2019.

SHARMA, L.K.; SIRDESAI, N.N.; SHARMA, K.M.; SINGH, T.N. **Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: a comparative study.** Applied Clay Science, v.152, p.183-195. 2018.

SUH, H.; JEE, H.; KIM, J.; KITAGAKI, R.; OHKI, S.; WOO, S.; JEONG, K.; BAE, S. **Influences of rehydration conditions on the mechanical and atomic structural recovery characteristics of Portland cement paste exposed elevated temperatures.** Construction and Building Materials, v.235. 2020.

TABET, W.E.; CERATO, A.B.; ELWOOD MADDEN, A.S.; JENTOFT, R.E. **Characterization of hydration products' formation and strength development in cement-stabilized kaolinite using TG and XRD.** Journal of Materials in Civil Engineering, v.30, n.10. 2018.

TEIXEIRA, I.; SARRO, W.S.; CARDOSO, S.M.; MACEDO, G.; FERREIRA, G.C.S. **Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos.** In: Proc. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, Brasil. 2015.

VENSON, G.I. **Módulo de resiliência e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada.** Dissertation (in Portuguese), Federal University of Rio Grande do Sul. 2015.

VINOTH, G.; MOON, S.W.; MOON, J.; KU, T. **Early strength development in cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements.** Soils and Foundations. v.58, n.5, p.1200-1211. 2018.

WANG, B.; ZHONG, S.; LEE, T.L.; FRANCEY, K.S.; MI, J. **Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state of the art review**. *Advances in Mechanical Engineering*, v.12, n.4. 2020

WANG, Y.; HAN, J.Q. **Geomechanical and ultrasonic characteristics of black shale during triaxial deformation revealed using real-time ultrasonic detection dependence upon bedding orientation and confining pressure**. *Geotechnical and Geological Engineering*, v.38, p.6773-6794. 2020.

WEI, Y.; YAO, W.; XING, X.; WU, M. **Quantitative evaluation of hydrated cement modified by silica fume using QXRD, AI MASNMR, TG-DSC and selective dissolution techniques**. *Construction and Building Materials*, v.36, p.925-932. 2012.

WEIDINGER, D.M.; GE, L.; STEPHENSON, R.W. **Ultrasonic pulse velocity tests on compacted soil**. In *GeoHunan International Conference 2009*. 2009.

WU, J.; LIU, L.; DENG, Y.; ZHANG, G.; ZHOU, A.; WANG, Q. **Distinguishing the effects of cementation versus density on the mechanical behavior of cement-based stabilized clays**. *Construction and Building Materials*, v.271. 2021.

YE, G.; LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; FRAAJI, A.L.A. **Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement**. *Cement & Concrete Composites*, v.26, p.491 – 497. 2004.

YESILLER, N.; INCI, G.; MILLER, C.J. **Ultrasonic testing for compacted clayey soils**. In *Proceedings of Geo-Denver 2000: Advances in Unsaturated Geotechnics* (Shackelford CD, Houston SL and Chang Ny (eds)). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Geotechnical Special Publication v.99, p.54-68. 2000.

YIM, H.J.; AN, Y.K.; KIM, J.H. **Water depercolation of setting cement paste evaluated by diffuse ultrasound**. *Cement & Concrete Composites*, v.71, p.10-19. 2016.

YOO, D.Y.; SHIN, H.O.; YOON, Y.S. **Ultrasonic monitoring of setting and strength development of ultra-high-performance concrete**. *Materials*, v.9, n.4. 2016.

YOUN, J.U.; CHOO, Y.W.; KIM, D.S. **Measurement of small-train shear modulus G_{max} of dry and saturated sands by bender element, resonant column and torsional shear tests**. *Canadian Geotechnical Journal*, v.45, n.10, p.1426-1438. 2008.

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DA CIMENTAÇÃO ARTIFICIAL NA ESTRUTURA E NO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE UMA ARGILA TROPICAL

Resumo: O comportamento hidromecânico de solos artificialmente cimentados é influenciado por diversos fatores, como propriedades do solo e do cimento, grau de compactação, condições de tensão aplicada e drenagem. A complexidade desse comportamento resulta em contradições quanto ao efeito da cimentação artificial em parâmetros geotécnicos, tais como parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade, por exemplo. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva investigar as alterações no comportamento hidromecânico de uma argila tropical devidas à variação do grau de cimentação artificial, tendo por base análises do efeito da cimentação a nível microestrutural como subsídio para interpretação dos resultados e avaliações mediante aplicação da técnica ultrassônica. Os ensaios ultrassônicos foram realizados para prover informações complementares sobre a taxa de alteração nas propriedades hidromecânicas do solo atribuída à cimentação. O programa experimental contemplou a realização de ensaios de caracterização geotécnica e microestrutural, determinação da curva de retenção de água, ensaios triaxiais adensados não drenados e aplicação da técnica ultrassônica para determinação de velocidades de ondas longitudinais (VPU) e cisalhantes (VSU). Foram investigadas as condições de solo natural e com cinco níveis distintos de cimentação artificial, buscando-se correlacionar as propriedades hidromecânicas com as alterabilidades observadas nas caracterizações geotécnica e geofísica devidas à presença do cimento. Os resultados da caracterização microestrutural demonstraram que a alteração de uma estrutura mais aberta, com poros de maior volume, para uma estrutura mais fechada, caracterizada pelo aumento das interconexões entre partículas devido ao surgimento das ligações cimentícias e o preenchimento dos vazios com material cimentante, influenciou nas propriedades mecânicas e hidráulicas avaliadas. Através das curvas características de retenção de água, foi observada uma tendência de aumento na retenção de água proporcional ao aumento do grau de cimentação. As alterações microestruturais, que dificultam a percolação da água e aumentam o nível de sucção, são responsáveis também por proporcionar um aumento na VPU. Os ensaios triaxiais apontaram que o aumento no grau de cimentação promoveu aumento da parcela de coesão, porém, para o ângulo de atrito, não foi observada tendência comportamental, apesar das variações de valores

observadas devidas à cimentação. A resistência não drenada apresentou um aumento devido à presença da cimentação artificial e com a tensão confinante. Boas correlações foram obtidas da associação da VSU com parâmetros obtidos dos ensaios triaxiais adensados e não drenados, o que indica a influência da rigidez inicial promovida pela cimentação na capacidade resistiva e na redução da deformabilidade, com o aumento do grau de cimentação. A aplicação da técnica ultrassônica, por ter seus resultados diretamente afetados pelas alterações microestruturais devidas à cimentação artificial, se mostrou viável como análise preliminar que subsidia a interpretação de alterações no comportamento hidromecânico, como resistência não drenada e capacidade de retenção de água, em obras geotécnicas que usam a estabilização solo-cimento.

Palavras-chave: grau de cimentação; microestrutura; comportamento hidromecânico; técnica ultrassônica.

1 INTRODUÇÃO

A existência de camadas de solo com alta deformabilidade e baixa capacidade de suporte pode gerar limitações de caráter técnico para o uso de técnicas tradicionais de engenharia geotécnica e influenciar diretamente no tipo de solução a ser adotada (Oliveira, 2015). A técnica de estabilização do solo com cimento é uma alternativa vastamente empregada em situações em que o solo existente não atende às especificações de projeto em obras de engenharia geotécnica (Fan; Wang; Qian, 2018; Behnood, 2018; Diambra *et al.*, 2019).

A estabilização com cimento é considerada eficaz no aumento da capacidade de suporte, na redução do peso efetivo do solo, na prevenção da liquefação e na imobilização de resíduos (Terashi, 1994; Zen, 1994). O efeito combinado da densificação obtida através do processo de compactação mecânica e a adição de cimento leva à formação de um geomaterial estruturado com performance superior à apresentada pelo material na condição natural (Haeri *et al.*, 2006; Lade; Trads, 2014; Bellato; Spagnoli; Simonini, 2020). De acordo com Belal, Ghembaza e Bellia (2019), esse aumento de performance, que pode ser observado através de ganhos em compactação, retenção de água e resistência térmica, constitui uma otimização dos projetos geotécnicos, reduzindo custo e duração da obra devido à possibilidade de uso de materiais locais tratados ao invés de transportar materiais de maior custo de locais remotos.

A reação dos compostos do cimento (silicato bicálcico, silicato tricálcico, aluminato tricálcico e ferro-aluminato tetracálcico) é dada em função de suas respectivas hidratações pela água presente no solo, após as quais é liberado um gel de silicatos de cálcio hidratados,

hidróxido de cálcio e etringita, constituindo os denominados produtos de hidratação do cimento, os quais irão responder pelas propriedades mecânicas do produto final (Almeida, 2009). As alterações que ocorrem na microestrutura durante o processo de hidratação também afetam o desenvolvimento da resistência mecânica dos materiais tratados com cimento (Jing *et al.*, 2022). Segundo He *et al.* (2020), a evolução/alteração da micromorfologia dos poros nos solos cimentados está primordialmente ligada à precipitação dos produtos de hidratação.

Argila e cimento reagem produzindo cimentações primária e secundária na matriz do solo tratado com cimento (Chew; Kamruzzaman; Lee, 2004). O cimento possui dois mecanismos de reações químicas, sendo que o primeiro começa no instante em que água é adicionada nos finos da mistura entre solo e cimento, e a reação secundária ocorre à medida que os íons de cálcio se difundem pelo solo (Chen; Wang, 2006). Essas reações químicas são responsáveis pelo desenvolvimento de resistência nos solos tratados com cimento. Segundo Ferreira, Casagrande e Teixeira (2022), essas interações entre o cimento e os minerais da argila promovem aumento de resistência, rigidez, durabilidade, estabilidade volumétrica, assim como reduzem a permeabilidade e a compressibilidade.

O endurecimento e o desenvolvimento da resistência de materiais tratados com cimento é um processo complexo de acoplamento de aspectos hidromecânicos (Jing *et al.*, 2022). Em vista a essas complexidades, estudos que buscam a compreensão do efeito da cimentação artificial nos solos devem se basear em ferramentas/teorias diversas que auxiliem numa abordagem mais abrangente. Nessa linha, o conceito do estado crítico é uma ferramenta útil e bem estabelecida para a interpretação do comportamento dos solos (Toll; Ong, 2003). Este conceito vem sendo aplicado por diversos autores como base para a avaliação do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados, considerando variáveis que envolvem as particularidades que surgem devidas à adição do cimento (Kasama; Ochiai; Yasufuku, 2000; Lee; Chan; Lam, 2004; Asghari; Toll; Haeri, 2004; Haeri; Seiphoori; Rahmati, 2008; Cruz; Rodrigues; Fonseca, 2011).

Jing *et al.* (2022) afirmam que fatores hidráulicos, como consumo de água durante a hidratação do cimento, condutividade hidráulica, propressão e retenção de água, apresentam forte influência nas propriedades hidromecânicas (resistência, rigidez, comportamento quanto à deformação e durabilidade dos solos com adição de cimento). Aspectos ligados à mistura de solo com cimento, tais como quantidade (Horpibulsuk *et al.*, 2010; Xuan; Molenaar; Houben, 2015) e tipo de cimento (Yilmaz *et al.*, 2015), relação água/cimento (Zhang; Wang; Song, 2018), tipo de solo (Ranaivomanana; Razakamanantsoa; Amiri, 2018), tempo e temperatura de cura (Fall; Samb, 2009; Wang; Fall; Wu, 2016), afetam significativamente o comportamento

hidromecânico de solos artificialmente cimentados.

Estudos demonstraram que a estrutura controla o comportamento de engenharia de argilas artificialmente cimentadas (Horpibulsuk *et al.*, 2003; 2005). De acordo com Jing *et al.* (2022), as alterações a nível microestrutural devidas à cimentação artificial compõem um mecanismo crítico que afeta significativamente o comportamento hidromecânico de solos tratados com cimento. Ranaivomanana, Razakamanantsoa e Amiri (2018) afirmam que um melhor entendimento sobre as interações entre a microestrutura de solos cimentados artificialmente e suas propriedades mecânicas e hidráulicas é necessário. Segundo Bin, Zhibin e Xiaoping (2007), a literatura existente sobre solos tratados com cimento é limitada se comparada com a literatura sobre solos tratados com cal. Neste sentido, a realização de investigações que abrangem uma interpretação dos resultados de propriedades mecânicas e hidráulicas de solos tratados com cimento, tendo por base as alterações produzidas a nível microestrutural, se fazem pertinentes para o avanço nesse entendimento.

Uma ferramenta que auxilia na compreensão do comportamento hidromecânico de solos tratados e não tratados é a curva de retenção de água. Suazo, Fourie e Doherty (2016) afirmam que a curva de retenção de água é fortemente afetada pela microestrutura do solo (formato e organização das partículas, disposição espacial dos poros e mineralogia), o que faz dela um mecanismo fundamental em estudos que buscam entender o comportamento hidromecânico a nível macro, subsidiado por análises microestruturais.

A curva de retenção de água possui um papel central no estudo de solos não saturados, fornecendo a relação entre teor de umidade e sucção (Pereira *et al.*, 2023a). Além disso, é empregada para estimativa de propriedades de solos não saturados (Fredlund, 2000; Zhai *et al.*, 2020), como a função de permeabilidade (Fredlund; Xing; Huang, 1994; Amadi; Osinubi; Okoro, 2023) e a envoltória de resistência ao cisalhamento (Vanapalli *et al.*, 1996; Fredlund *et al.*, 1996; Pham; Sutman; Medero, 2023). Estudos apontam que a composição química da água (Aubertin *et al.*, 2003) e fatores, como histórico de tensões (Vanapalli; Fredlund; Pufahl, 1999), variações no índice de vazios, formato dos poros e alteração de orientação de poros como resultado do aumento de tensão atuante (Khalili; Geiser; Blight, 2004; Zhou; Ng, 2014), afetam as características das curvas de retenção.

Diferenças na capacidade de retenção de água são esperadas quando diferentes quantidades de um mesmo agente químico (cimento, cal, etc.) forem utilizadas para a estabilização de solo (Eyo; Ng'ambi; Abbey, 2022). Apesar de algumas exceções, no geral, um aumento na quantidade de agente químico utilizado para estabilização do solo leva a um

aumento na capacidade de retenção de água no solo, considerando mesmas condições de ensaio (Hoyos; Thudi; Puppala, 2007; Yang *et al.*, 2011).

Nesta linha e considerando a premissa de que a cimentação artificial altera a microestrutura do solo (Pereira *et al.*, 2023b), estudos que avaliam o efeito de tal alteração na curva de retenção de água são aplicáveis para entendimento do comportamento hidromecânico de solos artificialmente cimentados. Em sua pesquisa, Mavroulidou *et al.* (2013) observaram que a adição de pequenas quantidades de cal a solos argilosos afetou a capacidade de retenção de água, a compressibilidade e a resistência efetiva do material.

Muitas pesquisas investigaram o efeito da cimentação artificial por cimento Portland no comportamento mecânico de solos argilosos e reportaram incrementos de resistência, rigidez e fragilidade do solo (Uddin, 1997; Yin; Lai, 1998; Tremblay; Leroueil; Locat, 2001; Tan; Goh; Yong., 2002; Rotta *et al.*, 2003; Horpibulsuk; Miura; Bergado, 2003; Horpibulsuk; Miura; Nagaraj, 2005; Lorenzo; Bergado, 2004; Chew; Kamruzzaman; Lee, 2004; Lee *et al.*, 2005; Xiao; Lee, 2008; Kamruzzaman; Chew; Lee, 2009; Jongpradist *et al.*, 2011). Filho e Consoli (2023) afirmam que mesmo uma pequena quantidade de cimento é suficiente para alterar a dinâmica das respostas de variação do volume dos solos às solicitações impostas, assim como também é responsável por um aumento substancial da resistência de pico, quando comparadas as respostas de amostras cimentadas e não cimentadas, moldadas com densidades similares.

De acordo com Sasanian e Newson (2014), os ganhos gerados na resistência de pico e na rigidez do material são devidos à formação de uma estrutura cimentícia dentro do esqueleto do solo. Constatações nessa linha reforçam a premissa de que a alteração da microestrutura devida à cimentação artificial influencia diretamente no comportamento hidromecânico.

Alguns estudos também investigaram os efeitos da adição de cimento na permeabilidade dos solos. Kaushinger, Perry e Hankour (1992) e Quang e Chai (2015) observaram em suas pesquisas que a permeabilidade de argilas tratadas com cimento reduz com o aumento do percentual de cimento. Entretanto, Suzuki *et al.* (1981) constataram um aumento da permeabilidade devido à floculação das partículas de argila resultante da adição de cimento. Chew, Kamruzzaman e Lee (2004) reportaram que, a uma mesma tensão efetiva vertical, a permeabilidade de um solo argiloso com adição de cimento foi maior do que a do mesmo solo na condição natural, devido à estrutura floculada resultante da reação de hidratação do cimento.

Segundo Topolnick (2013), outro parâmetro que controla a qualidade das misturas de solo com cimento é o peso específico, o que pode apresentar grande importância para projetos envolvendo melhoramento de solo para fins de estabilidade de taludes e pode gerar ganhos de resistência. Tyagi *et al.* (2019) afirmam que pouco se sabe sobre a influência da adição de

cimento e de sua proporção no peso específico do solo tratado. Topolnicki (2013) observou que, na maioria dos casos, o peso específico dos solos melhorados com cimento pode aumentar ou reduzir, dependendo do tipo de solo, da química da mistura e da técnica empregada para realizar a mistura.

Outro efeito da cimentação artificial do solo que constitui ainda uma incógnita é a sua influência no ângulo de atrito. Silva (2016) afirma que, na literatura, não existe um consenso sobre o comportamento do ângulo de atrito em função da variação do teor de cimento. Clough *et al.* (1979; 1981), ao estudarem o comportamento de areias cimentadas, observaram que o ângulo de atrito parece não ser influenciado pelo grau de cimentação, mas sim pela densidade relativa e arranjo das partículas.

Segundo Prietto (2004), o ângulo de atrito do solo cimentado é da mesma ordem de grandeza do ângulo de atrito do solo não cimentado. Custódio (2009), em sua pesquisa envolvendo um solo argiloso e um solo arenoso, obteve, a partir do acréscimo de pequenos percentuais de cimento, alterações no valor da coesão apresentada pelo solo, mas não obteve variações no ângulo de atrito. Ranaivomanana, Razakamanantsoa e Amiri (2018) constataram um aumento da coesão devido à adição de cimentação artificial gerado pelas ligações cimentícias e intensificado pelo efeito do processo de compactação.

Em sua pesquisa, Filho e Consoli (2023) identificaram que os parâmetros efetivos de resistência de pico se mostraram dependentes da dosagem de cimento de forma conjunta aos mecanismos de mobilização de resistência. Os resultados obtidos pelos autores apresentam diferença de magnitude das parcelas de resistência entre ângulo de atrito de pico e coesão, considerando a variação de densificação e cimentação. Nessa linha, ferramentas que auxiliam a identificar alterações devidas à cimentação são fundamentais para a compreensão mais precisa da influência da cimentação artificial, auxiliando na compreensão dos motivos que levam à variação de resultados na literatura, sabendo que são diversos os fatores que influenciam nos resultados de resistência ao cisalhamento de solos cimentados.

Além das já citadas análises microestruturais, uma ferramenta que pode ser aplicada para auxiliar na compreensão das alterações promovidas pela cimentação artificial na estrutura dos solos é a técnica ultrassônica, considerando-se a propagação de ondas ultrassônicas. Técnicas que utilizam a propagação de ondas são frequentemente utilizadas para a análise da rigidez atingida por camadas de solo estabilizadas (Amaral *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2013).

A transmissão de ondas através da técnica ultrassônica é um ensaio não destrutivo que pode ser empregado para determinar propriedades de materiais que sejam capazes de transmitir as ondas (Weidinger; Ge; Stephenson, 2009). Entre os modos diferentes de ondas elásticas que

podem ser transmitidas, é possível citar modos de compressão e de cisalhamento, com movimentos paralelos e perpendiculares à direção de propagação e velocidades correspondentes longitudinal e transversal, respectivamente (Amaral *et al.*, 2011).

Em estudos geotécnicos, foram observados fatores semelhantes que influenciam as ondas longitudinais e as transversais. Autores apontaram, como fatores que influenciam na velocidade de propagação da onda longitudinal, a estrutura do solo, índice de vazios, energia de compactação, teor de umidade, densidade do solo, entre outros (Ferreira *et al.*, 2014; Adem;Vanapalli, 2015; Sarro; Ferreira; Galletto, 2015; Teixeira *et al.*, 2015; Oh;Vanapalli, 2016; Champiré *et al.*, 2016; Dongqing *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017).

Meysam (2021) afirma que diversos fatores podem afetar a velocidade de onda transversal obtida em ensaios com solos granulares e coesivos. Segundo o autor, estudos prévios estabeleceram o índice de vazios, grau de compactação ou consolidação, estrutura e característica das partículas entre os principais fatores.

Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido considerando-se a necessidade de se avançar na compreensão dos efeitos da cimentação artificial nos solos, devida a muitos contrastes ainda existentes na literatura técnico-científica sobre este tema. Para tal propósito, ele ressalta a importância da compreensão da microestrutura na análise crítica do comportamento macro apresentado pelas misturas de solo com cimento, assim como estimula a aplicação da técnica ultrassônica como ferramenta para ampliação do entendimento dos efeitos da cimentação artificial sobre o comportamento de engenharia de tais materiais.

O objetivo consistiu em avaliar o efeito da variação do percentual de cimento sobre propriedades hidromecânicas de um solo tropical residual argiloso, tendo como base a interveniência de características microestruturais e as respostas obtidas pela aplicação da técnica ultrassônica, buscando-se correlacionar as propriedades hidromecânicas investigadas com as alterabilidades observadas em tais características devidas à presença do cimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Solo

O solo selecionado, de ocorrência expressiva na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais, Brasil, consiste em um solo residual maduro de gnaise, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, com granulometria argilo-areno-siltosa. A classificação do solo segundo a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), de acordo com a CLA 259 (DNER, 1996), é LG', o que indica um comportamento laterítico. Segundo Sanbonsuge *et al.* (2017), em geral, solos lateríticos são estáveis por natureza, e o cimento age como aditivo capaz de proporcionar ganhos de resistência e rigidez.

Para a caracterização química e a identificação dos óxidos que compõem o solo, foi empregada a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização química do solo por FRX e perda ao fogo

Composição química do solo residual adotado (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl	PF*
27,11	24,52	12,47	0,02	1,28	0,07	1,55	1,53	0,04	0,27	11,49

*Perda ao fogo

Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Conforme a Tabela 1, é possível observar a ocorrência de compostos químicos típicos dos solos residuais e constatar um predomínio dos compostos sílica e alumina e também uma quantidade significativa de óxido de ferro. No que se refere aos óxidos alcalinos e alcalinos terrosos (CaO, MgO e K₂O), foram constatados baixos teores.

Além do FRX, para a caracterização química do solo, foi realizada a determinação do pH em água de acordo com os procedimentos prescritos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017), sendo encontrado o valor de 5,63, o qual, segundo Neto, Carvalho e Capuzzo (2019), encontra-se na faixa de valores típicos de solos com comportamento laterítico.

A caracterização mineralógica do solo (Figura 1) foi obtida a partir da técnica de Difração de Raios-X (DRX), utilizando o difratômetro *Bruker D8 Discover* com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), com o ângulo 2θ variando de 5° a 55° , utilizando passo de $0,05^\circ$ em uma aquisição de 1 segundo por passo.

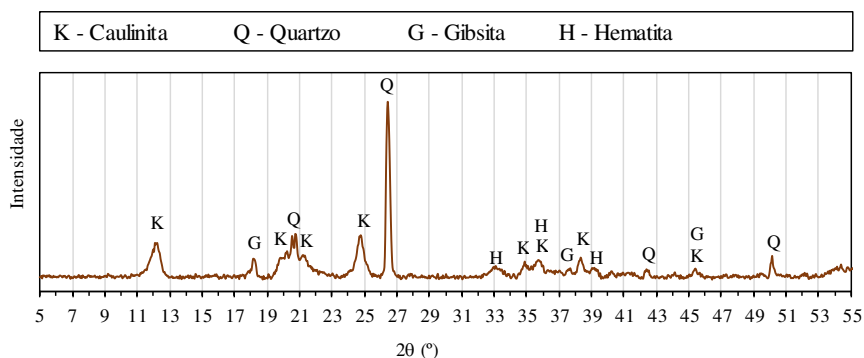


Figura 1: Difratograma do solo adotado na pesquisa
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Analisando o difratograma da Figura 1, foram identificados os seguintes minerais: caulinita, quartzo, gibsite, hematita. A presença desses minerais na amostra avaliada coincide com os resultados encontrados por Trindade (2006), Crispim (2010) e Dias Neto (2020) para solos da mesma região. Assim como a maioria dos solos brasileiros, devido a sua formação ocorrer em condições tropicais (EMBRAPA, 2017), o solo avaliado nesta pesquisa é caulínico, o que, segundo Lopes *et al.* (2019), pode ser definido pelo fato deste solo ter como seus principais constituintes a caulinita e o quartzo (Figura 1) e, conseqüentemente, elevados níveis de SiO_2 e Al_2O_3 terem sido detectados (Tabela 1).

2.1.2. Material cimentante

Como material cimentante a ser adicionado ao solo, foi adotado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), por sua alta reatividade inicial, fator que evita a ocorrência de reações tardias entre cimento e solo. Na Tabela 2, são apresentados os resultados da caracterização física do cimento.

Tabela 2: Caracterização física do cimento CPV-ARI.

Ensaios	Normas Técnicas	Resultados
Massa Específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,065 g/m ³
Área Específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)	1892 m ² /kg
Índice de finura	NBR 11579 (ABNT, 2013)	0,1 %
Consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018a)	32,8 g
Expansibilidade	NBR 11582 (ABNT, 2016)	Frio – 0,2 mm
		Quente – 0,1 mm
Tempo de Pega	NBR 16607 (ABNT, 2018b)	Início – 15:04
		Fim – 15:58
Resistência à Compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019a)	3 dias – 45,6 MPa
		7 dias – 50,0 MPa
		28 dias – 61,0 MPa

Fonte: (Autoria própria, 2024)

A caracterização mineralógica do cimento foi obtida a partir da técnica de DRX, utilizando-se o mesmo equipamento e as mesmas considerações de ensaio adotadas para o solo. A Figura 2 apresenta os resultados do DRX do cimento.

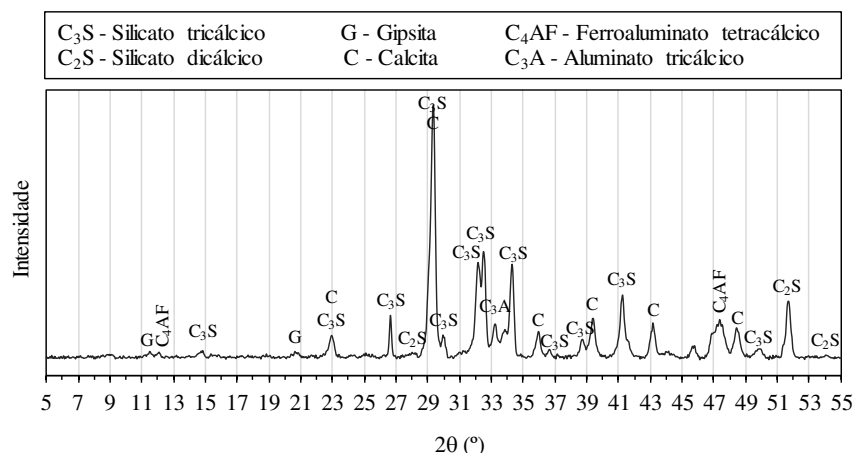


Figura 2: Difratograma do cimento CPV-ARI adotado na pesquisa
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Com base na análise do difratograma da Figura 2, foram identificados picos referentes aos cristais alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato (C₃A) e ferrita (C₄AF), e às fases cristalinas calcita (CaO) e gipsita (CaSO₄.2H₂O). Além disso, foi possível observar a presença de picos significativos de alita (C₃S), o que já era esperado para um cimento CPV-ARI, pois sua quantidade determina a resistência do cimento Portland nas idades iniciais (Taylor, 1997; Lu *et al.*, 2018; Ouzia; Scrivener, 2019).

2.2. Métodos

2.2.1. Preparo de amostras, moldagem dos corpos de prova e cura

Para estudar a influência da cimentação artificial no solo residual tropical, foram avaliadas cinco percentagens diferentes de cimento Portland CPV-ARI: 1%, 2%, 3%, 5% e 7%. A quantidade de cimento utilizada em cada mistura foi calculada com base na massa de solo seco e no teor de umidade alvo. Todas as amostras de solo foram preparadas com o teor de umidade ótimo do solo natural (31,9%), obtido através da curva de compactação Proctor Normal do solo natural segundo a D698 (ASTM, 2021a).

O mesmo teor de umidade foi utilizado para preparar todas as amostras e corpos de prova deste estudo, de forma a reduzir o número de variáveis experimentais. Segundo Consoli

et al. (2007), as alterações na resistência e rigidez devidas ao efeito da cimentação artificial em solos estão provavelmente relacionadas com as estruturas criadas durante o processo de moldagem. Os autores ainda afirmam que a quantidade de água disponível no sistema também desempenha um papel fundamental na formação dessas estruturas. Assim, utilizando o mesmo teor de umidade inicial para a preparação das misturas solo-cimento, é possível obter uma avaliação mais direta dos efeitos do teor de cimento na formação destas estruturas e associar as diferenças à variação do teor de cimento.

Para os ensaios geotécnicos, mineralógicos e de pH, foram preparadas amostras deformadas de solo natural e de misturas de solo com cimento, conforme o procedimento apresentado por Pereira *et al.* (2023b), através das etapas a seguir:

1. Amostras de solo natural foram separadas e determinado o seu teor de umidade pelo método da estufa;
2. Em cinco sacos plásticos distintos, foram preparadas cinco amostras diferentes, considerando cinco teores de cimento (1%, 2%, 3%, 5% e 7%). Em cada amostra, foi adicionado um percentual de cimento em relação à massa seca do solo e, em sequência, as amostras eram homogeneizadas;
3. Nas amostras de solo com cimento, foi adicionada água destilada em quantidade suficiente para que fosse atingido o teor de umidade ótimo do ensaio Proctor Normal realizado no solo natural ($w = 31,9\%$);
4. Em sequência, cada uma das cinco amostras, referente a cada teor de cimento testado, era individualmente homogeneizada, passando-as em uma peneira para garantir uma homogeneização completa;
5. Após estarem devidamente homogeneizadas, as amostras foram novamente colocadas em sacos plásticos e fechadas hermeticamente para que fosse garantida total vedação, evitando-se perda de água para o ambiente;
6. Os sacos eram então armazenados em ambiente de temperatura controlada e as amostras eram curadas por um período de 7 dias;
7. Passado o período de cura, eram secas ao ar até próximo da umidade higroscópica;
8. Após a secagem das amostras, os torrões eram desmanchados, tendo-se o cuidado de evitar a quebra dos grãos e, em seguida, as amostras eram novamente homogeneizadas para que fosse garantida sua representatividade;
9. Visando a padronização do processo para que fosse permitida a replicabilidade, todo o processo de mistura e homogeneização do solo, cimento e água era realizado em até no máximo 10 minutos.

Especificamente para o ensaio de massa específica dos grãos, considerando os procedimentos normativos da D854 (ASTM, 2014), foram separados 250g dessa amostra seca ao ar e homogeneizada (após realizado o passo 8). Desta quantidade, parte foi destinada para a determinação do teor de umidade e uma outra quantidade era tomada e colocada no picnômetro, tal que a massa seca fosse em torno de 50g.

No caso dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade segundo a D4318 (ASTM 2017), das amostras secas e homogeneizadas obtidas após os 8 passos apresentados, uma fração foi tomada e passada na peneira de 0,42mm de modo que fossem obtidos 200g de material passado, conforme recomendação da norma dos ensaios.

Para a realização dos ensaios não destrutivos (Ultrassom e MEV) e destrutivos (Triaxiais Isotropicamente Adensados Não Drenados e Curva de Retenção de Água), os corpos de prova foram moldados por compactação estática. Para a produção dos corpos de prova de solo natural, o solo umedecido foi misturado em um saco plástico que era hermeticamente fechado e aguardado um período de 24hrs para homogeneização da umidade. Para a produção dos corpos de prova a partir das misturas de solo-cimento, os métodos de preparação foram os mesmos apresentados para os ensaios de caracterização, mas sem os procedimentos de tempo de cura. Assim, as amostras eram compactadas imediatamente após a homogeneização, sendo adotado um tempo inferior a 45 minutos para a mistura e compactação dos corpos de prova. Tal critério foi adotado devido ao fato de se estar trabalhando com um cimento Portland de alta resistência inicial.

Após a compactação, todos os corpos de prova eram envoltos por papel filme e colocados em sacos hermeticamente fechados para evitar a variação de umidade devido ao contato com o ar ambiente. Em sequência, eram levados para câmara úmida, onde ficavam durante um intervalo de tempo de 7 dias para a cura.

Pesquisas anteriores sugeriram que o índice de vazios, a energia de compactação e a estrutura do solo afetam a propagação de ondas ultrassônicas (Adem; Vanapalli, 2015; Oh; Vanapalli, 2016). Outros trabalhos indicaram que a quantidade de água, a densidade do solo e o tipo de transdutor também afetaram as medições da velocidade de propagação de ondas (Ferreira *et al.*, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Sarro *et al.*, 2015; Champiré *et al.*, 2016; Dongqing *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017). Portanto, um único valor de referência de peso específico aparente seco ($10,77 \text{ kN/m}^3$) e índice de vazios (1,60) foi selecionado para moldagem de todos os corpos de prova da pesquisa (tratados e não tratados com cimento). Conseqüentemente, as variações observadas nas ondas longitudinais e cisalhantes do ensaio ultrassônico, VPU e VSU,

respectivamente, estariam relacionadas principalmente aos efeitos da cimentação artificial observados em cada espécime diferente.

2.2.2. Análise do pH do solo e das misturas de solo com cimento

Para a determinação dos valores de pH do solo na condição natural e com a adição dos diferentes teores de cimento investigados neste trabalho, foi realizada a determinação do pH em água de acordo com os procedimentos prescritos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017). As amostras utilizadas foram preparadas conforme a descrição apresentada no item 2.2.1, considerando amostras deformadas na condição natural e com adição de cimento, com 7 dias de cura.

Para avaliar a ocorrência de reações de hidratação do cimento, foi realizado um teste rápido envolvendo a aspensão de fenolftaleína 1% em procedimento similar ao adotado por Lyra e Monteiro (2021) para a análise da frente de carbonatação em corpos de prova de concreto. A fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) é um indicador incolor, o qual tem a cor alterada de acordo com o valor do pH (roxo, sob pH maior que 9, e incolor, sob pH abaixo de 9).

O teste foi realizado em corpos de prova cilíndricos ($H = 100$ mm e $D = 50$ mm) moldados com teor de umidade de 31,9%, nas condições de solo natural e solo com cimento (1%, 2%, 3%, 5% e 7%) com 7 dias de cura. Para a realização dos testes, os corpos de prova eram levados para a estufa a 60°C por um período de 24hr. Em sequência, eram partidos ao meio e a fenolftaleína era borrifada na parte central das metades dos corpos de prova.

2.2.3. Caracterização geotécnica e microestrutural

Para o estudo da influência da cimentação artificial no solo residual tropical argiloso investigado, foram testados cinco percentuais de cimento Portland CPV-ARI. O efeito da variação do percentual do cimento foi investigado considerando-se a interferência da cimentação nos parâmetros de caracterização geotécnica do solo, conforme listados na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaio de caracterização geotécnica

Ensaio	Norma técnica
Granulometria completa	D7928 (ASTM, 2021b)
Limites de Atterberg	D4318 (ASTM, 2017)
Massa específica dos grãos	D854 (ASTM, 2014)

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Para a investigação do pH das misturas de solo com cimento, foi utilizado um peagâmetro e foram considerados os procedimentos prescritos pela EMBRAPA (2017). No que se refere à caracterização mineralógica das misturas, esta foi obtida com base no ensaio de DRX.

A investigação do efeito da cimentação artificial no solo argiloso tropical a nível microestrutural, visando ampliar a compreensão das alterações devidas à adição de cimento e subsidiar a interpretação dos ensaios realizados nesta pesquisa para análise das variações no comportamento hidromecânico, foi desenvolvida por meio da aplicação da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por elétrons secundários. Ensaios de MEV foram realizados para a obtenção da caracterização microestrutural das estruturas geradas pelos diferentes teores de cimento adotados e da microestrutura do solo na condição natural.

2.2.4. Curva de retenção de água

A determinação das curvas de retenção de água no solo foi realizada por processo de secagem (drenagem), através das técnicas da Mesa de Sucção e da Câmara de Richards, empregando-se o princípio da translação de eixos. Considerando o objetivo de se avaliar o efeito da cimentação artificial no solo argiloso tropical, foram investigados os intervalos de sucções de 0 a 10 kPa (Mesa de Sucção) e de 20 a 1500 kPa (Câmara de Richards), respectivamente.

Esse intervalo de sucção foi adotado considerando constatações experimentais da literatura técnico-científica que afirmam que a maior influência do teor de cimento em solos argilosos ocorre na parte da curva de retenção de água com níveis de sucção menores que 1500 kPa (Alkiki *et al.*, 2021). Stoltz, Cuisinier e Masrouri (2012) e Elkady, Al-Mahbashi e Al-Refeai (2015) afirmam que, para elevados níveis de sucção, as alterações geradas nos solos tratados com cimento são bem similares às que ocorrem nos solos na condição natural, sendo observada uma tendência de convergência nas respostas. Assim, como o objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da cimentação artificial e como ela altera o comportamento da curva de retenção de água do solo argiloso, a análise a menores níveis de sucção, considerando como nível máximo 1500 kPa, se faz justificável.

A determinação das curvas de retenção seguiu a diretriz preconizada pela norma D6836-16 (ASTM, 2016). Para esse estudo, foram utilizadas amostras obtidas por compactação estática nas condições de solo natural e solo com adição de diferentes teores de cimento, visando avaliar-se o efeito da variação do grau de cimentação nos resultados obtidos. Os corpos de prova compactados foram anéis de dimensões de 54 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos (teor de umidade gravimétrico e sucção total), foi empregado o *software SWRC Fit* desenvolvido por Seki (2007) e disponível no seguinte link: <https://seki.webmasters.gr.jp/swrc/>. A opção pelo uso do software mencionado baseou-se no fato de este estar disponível com fácil acesso e permitir o ajuste dos dados experimentais para distintos modelos de forma simultânea.

Além disso, o *SWRC Fit* contempla, atualmente, as equações multimodais de retenção de água e de condutividade hidráulica propostas por Seki *et al.* (2022), que se mostraram eficazes para os estudos de diferentes tipos de solos. Seki *et al.* (2023) confirmam a flexibilidade dos modelos selecionados e concluem que as formulações de modelo propostas são muito úteis para aplicações práticas, matematicamente consistentes e relativamente simples.

Foram testados os modelos de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) por serem consagrados na comunidade geotécnica e aplicados com recorrência, além de terem apresentado bons resultados de correlação com os dados experimentais deste trabalho. Na Tabela 4, são apresentados os modelos testados neste trabalho. No artigo de Seki (2007), todas as equações e parâmetros apresentadas na Tabela 4 são detalhadamente explicados.

Tabela 4: Modelos de ajuste da curva de retenção de água

Modelo testado no <i>SWRC Fit</i>	Equação
van Genuchten (1980)	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (m = 1 - 1/n)$
Fredlund e Xing (1994)	$S_e = \left[\frac{1}{\ln [e + (h/a)^n]} \right]^m$

* S_e : sucção efetiva * h : sucção matricial * e : índice de vazios * m , n , a e α : parâmetros de ajuste dos modelos

Fonte: (Adaptado de Seki, 2007)

Considerando que o objetivo da aplicação dos modelos foi apenas a obtenção do formato da curva de retenção de água, foram adotadas considerações apresentadas por Seki (2023). De acordo com o autor, se o objetivo for apenas a descrição da curva de retenção de água, pode-se realizar o ajuste e avaliar o desempenho considerando-se os parâmetros R^2 e AIC (*Akaike Information Criterion*), assim como as curvas ajustadas. Tal estratégia foi adotada na presente pesquisa, considerando as premissas do autor do *SWRC Fit* (Seki, 2023) e também o fato de que o critério de informação Akaike (AIC) consiste em uma métrica que mensura a qualidade de um modelo estatístico visando também sua simplicidade (McElreath, 2018; Taddy, 2019).

2.2.5. Ensaio de pulso ultrassônico

Para subsidiar as análises do efeito da cimentação artificial no comportamento hidromecânico do solo argiloso estudado, foram realizados ensaios de pulso ultrassônico em corpos de prova na condição natural e com diferentes graus de cimentação.

A análise do efeito da cimentação na velocidade de propagação de onda do pulso ultrassônico foi realizada com base nos dados coletados pelo indicador digital ultrassônico não destrutivo portátil (PUNDIT), cujos transdutores possuem uma frequência de 54 kHz. A configuração de arranjo dos transdutores adotada no ensaio foi a correspondente ao método direto, o qual, segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019b), maximiza a transmissão e o recebimento da energia do pulso ultrassônico pelo corpo de prova. Os corpos de prova foram compactados em moldes cilíndricos de dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Na execução do ensaio, as faces dos corpos de prova, envoltos por uma película de papel filme totalmente aderida, eram parcialmente cobertas com uma camada de gel à base de água, e os transdutores do PUNDIT acoplados e firmemente pressionados nas suas superfícies. O equipamento era então acionado, e ondas de pulso ultrassônico (longitudinais ou transversais) eram geradas através dos corpos de prova. Depois de percorrida a distância referente à altura dos corpos de prova, o PUNDIT realizava a medição do tempo de viagem da onda e fornecia o valor da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, podendo ser velocidades das ondas longitudinais (VPU) ou das ondas transversais (VSU). Salienta-se que este procedimento de ensaio foi realizado por outros pesquisadores para registro da velocidade de propagação do pulso ultrassônico (Sarro; Ferreira, 2019; Selçuk; Seker, 2019; Nalon *et al.*, 2021).

2.2.6. Fator vazios/cimento

Para avaliar o efeito da variação do grau de cimentação artificial no solo argiloso compactado, a partir das velocidades de onda considerando a técnica ultrassônica aplicada, foram investigadas possíveis correlações entre o fator vazios/cimento e as VPU e VSU, pois, segundo Severo (2011), o fator vazios/cimento é um parâmetro chave para controle da resposta mecânica de solos cimentados artificialmente.

De acordo com Consoli *et al.* (2007), o fator vazios/cimento é definido pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor de cimento. Quando ajustado por um expoente, este fator tem se mostrado adequado para a avaliação das resistências à compressão simples e ao cisalhamento triaxial, apresentando grande utilidade no projeto e controle de execução de camadas de solos tratados com cimento. Consoli *et al.* (2007) e Foppa *et al.* (2007)

demonstraram que, para o solo e para os teores de cimento estudados em suas pesquisas, a resistência à compressão simples cresce linearmente com o aumento do teor de cimento e exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

O fator vazios/cimento foi avaliado em correlações para análise da cimentação artificial em diversos ensaios geotécnicos tradicionais por diversos autores (Consoli *et al.*, 2007; Foppa, 2005; Foppa *et al.*, 2007; Cruz, 2008; Silva; Fonseca; Consoli, 2009; Consoli *et al.*, 2010; Floss *et al.*, 2010; Silva, 2011; Severo, 2011; Venson, 2015).

Nesta pesquisa, diferentemente das demais citadas que empregaram a porosidade, foi adotada uma razão entre o índice de vazios e o teor de cimento como fator vazios/cimento, por ter apresentado uma melhor correlação com a regressão dos dados experimentais obtidos, ou seja, maiores valores de R^2 . Considerando que a aplicação da técnica ultrassônica é para auxiliar a compreensão das variações causadas pela cimentação e que a única variação entre os corpos de prova submetidos a este ensaio foi o teor de cimento, a aplicação deste fator, que considera de forma direta o grau de cimentação, se faz pertinente.

2.2.7. Ensaio Triaxial Isotropicamente Adensado e Não Drenado (CIU)

Com o objetivo de avaliar a influência da cimentação na resistência ao cisalhamento do solo, foram realizados ensaios triaxiais isotropicamente adensados e não drenados (CIU). Os procedimentos de ensaio foram realizados conforme a norma técnica D4767-11 (ASTM, 2011).

Foram compactados corpos de prova cilíndricos de dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para a realização dos ensaios. Na etapa de saturação, foram consideradas as técnicas de percolação de água e contrapressão para a saturação dos corpos de prova, que foram ensaiados apenas após obter-se valores de parâmetro B maiores de 0,95.

Os corpos de prova, nas condições de solo natural e com cimentação, foram adensados com as tensões de 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa e levados à ruptura por carregamento axial, com velocidade de 0,10 mm/min, sendo impedida a drenagem dos corpos de prova durante a fase de cisalhamento.

O critério empregado para a obtenção da envoltória de resistência foi o de Mohr-Coulomb, considerando-se os critérios da obliquidade máxima e da desviadora máxima. Além disso, foi aplicada a Teoria dos Estados Críticos, com base na Mecânica dos Estados Críticos (Schofield; Wroth, 1968; Neves, 2016), como ferramenta para a análise crítica dos resultados, sendo empregada com o objetivo de se ampliar os cenários de análise comparativa do solo nas condições natural e cimentado, tendo por base os resultados dos ensaios CIU, e auxiliando na

compreensão dos efeitos dos diferentes graus de cimentação artificial no comportamento mecânico do solo argiloso estudado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise do efeito da cimentação nas caracterizações geotécnica e microestrutural

Para avaliar a ocorrência de reações de hidratação do cimento, foi realizado um teste rápido envolvendo a aspersão de fenolftaleína 1%. Os resultados desse procedimento são expostos através da Figura 3. A imagem referente ao solo natural (Figura 3a) mostra que o solo manteve sua coloração original após a ação da fenolftaleína, tendo esta indicado uma condição incolor. Esse resultado já era esperado devido ao fato de o solo ter apresentado um pH classificado como ácido (pH = 5,63).

No que se refere ao solo com as adições de cimento (Figuras 3b a 3f), as imagens mostram a alteração da coloração para roxo, o que indica um meio básico (ou alcalino) devido às alterações promovidas no pH em vista às reações do cimento, conforme afirmado anteriormente. A diferença de coloração dos corpos de prova de solo com cimento (bordas externas na coloração original do solo e região central do corpo de prova roxa) é devida à frente de carbonatação, pois, segundo Deneele *et al.* (2021), com o uso da fenolftaleína, é possível revelar uma região não carbonatada e uma região carbonatada em um mesmo corpo de prova.

A geração do meio alcalino nas misturas é resultado da liberação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado, provenientes da reação do cimento com a água presente no solo, o que gera um aumento do pH da mistura (Basso *et al.*, 2003).

Além desse teste rápido, foram medidos os pHs do solo e das misturas de solo com cimento, cujos resultados são apresentados na Figura 4.

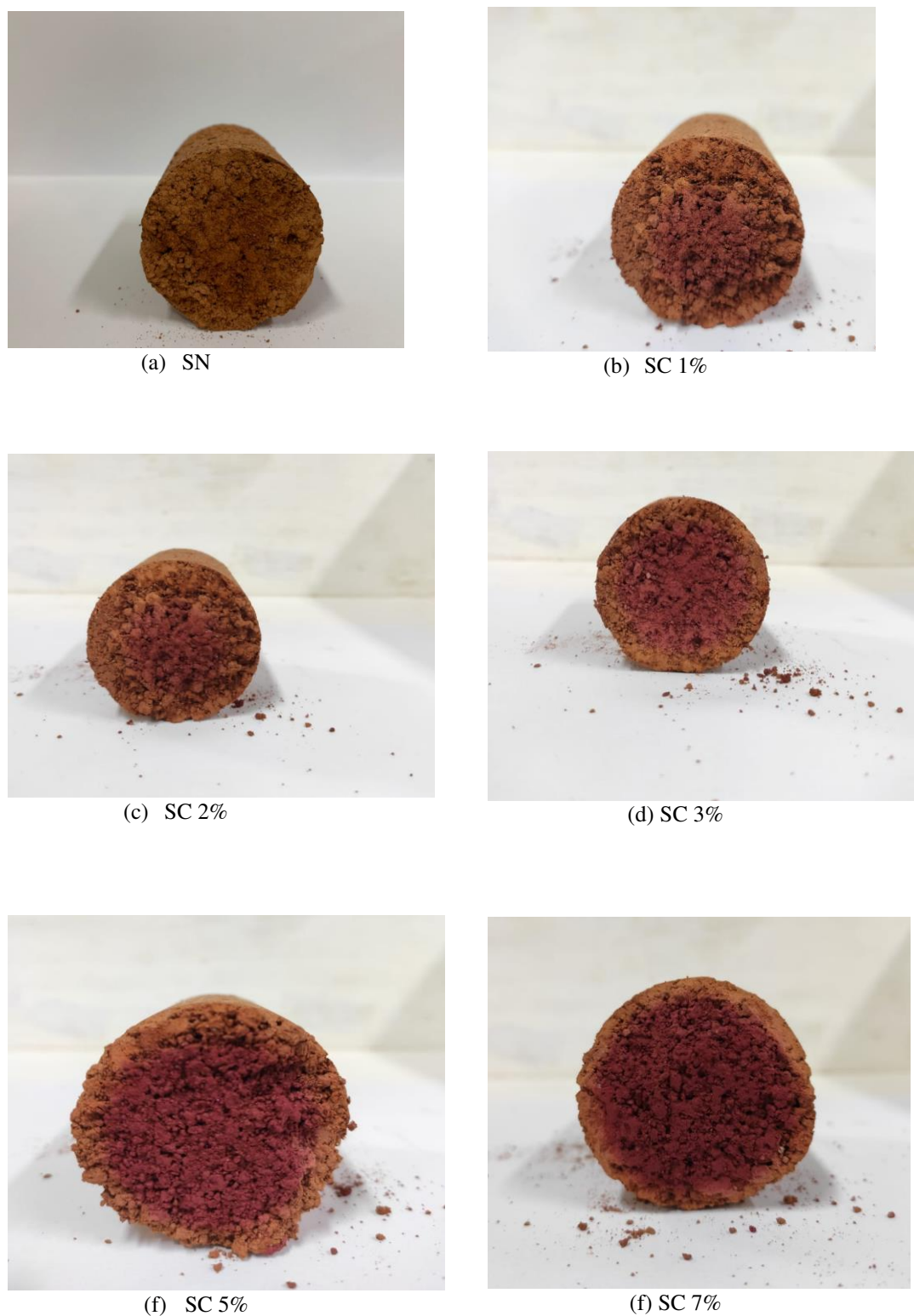


Figura 3: Imagens dos corpos de prova após a ação da fenolftaleína: (a) solo natural; (b) solo com 1% de cimento; (c) solo com 2% de cimento; (d) solo com 3% de cimento; (e) solo com 5% de cimento; (f) solo com 7% de cimento

Fonte: (Autoria própria, 2024)

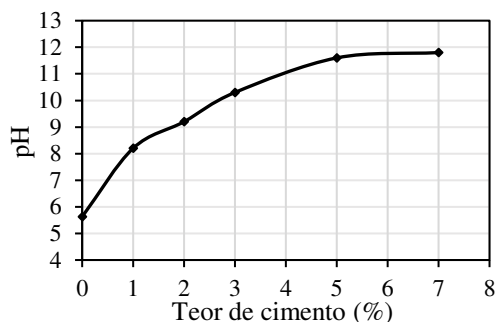


Figura 4: Variação de pH com o teor de cimento nas misturas de solo com cimento
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Os valores de pH apresentados na Figura 4 indicam a formação de um meio básico, já identificado nos testes com fenolftaleína (Figura 3), uma vez que o pH de todas as misturas de solo com cimento avaliadas foram maiores do que 7 ($\text{pH} > 7$). Além disso, é possível perceber um aumento do pH das misturas com o aumento do teor de cimento adicionado, de modo que uma maior quantidade de cimento presente na mistura implica em maior nível de basicidade. Quanto maior o teor de cimento, mais reações de hidratação ocorrem e uma maior quantidade de cal é liberada no meio, o que resulta em uma elevação mais significativa do pH da mistura.

Estes resultados, que indicam a ocorrência de reações químicas entre o solo e o cimento, explicam o fato de a presença do cimento no solo ter gerado incrementos de rigidez e resistência, conforme será observado nos resultados dos ensaios propostos neste trabalho. Tabet *et al.* (2018) ressaltam que os produtos obtidos das reações de hidratação do cimento promovem ganhos de rigidez e resistência.

No que se refere à caracterização microestrutural das estruturas compactadas de solo natural e solo com cimento, as imagens obtidas através do MEV são apresentadas na Figura 5. Comparando-se a imagem da estrutura de solo natural (Figura 5a) com as correspondentes às estruturas com adições de cimento (Figuras 5b a 5f), é possível constatar uma mudança da micromorfologia devida à adição do material cimentante ao solo. Observa-se uma provável tendência de redução dos macroporos com o aumento do percentual de cimento, resultando em estruturas com mais microporos. A explicação para tal tendência, segundo Horpibulsuk (2012), consiste no fato de que os produtos cimentícios não apenas aumentam a resistência da união entre os aglomerados, mas também preenchem os espaços vazios do solo e reduzem significativamente o volume dos poros.

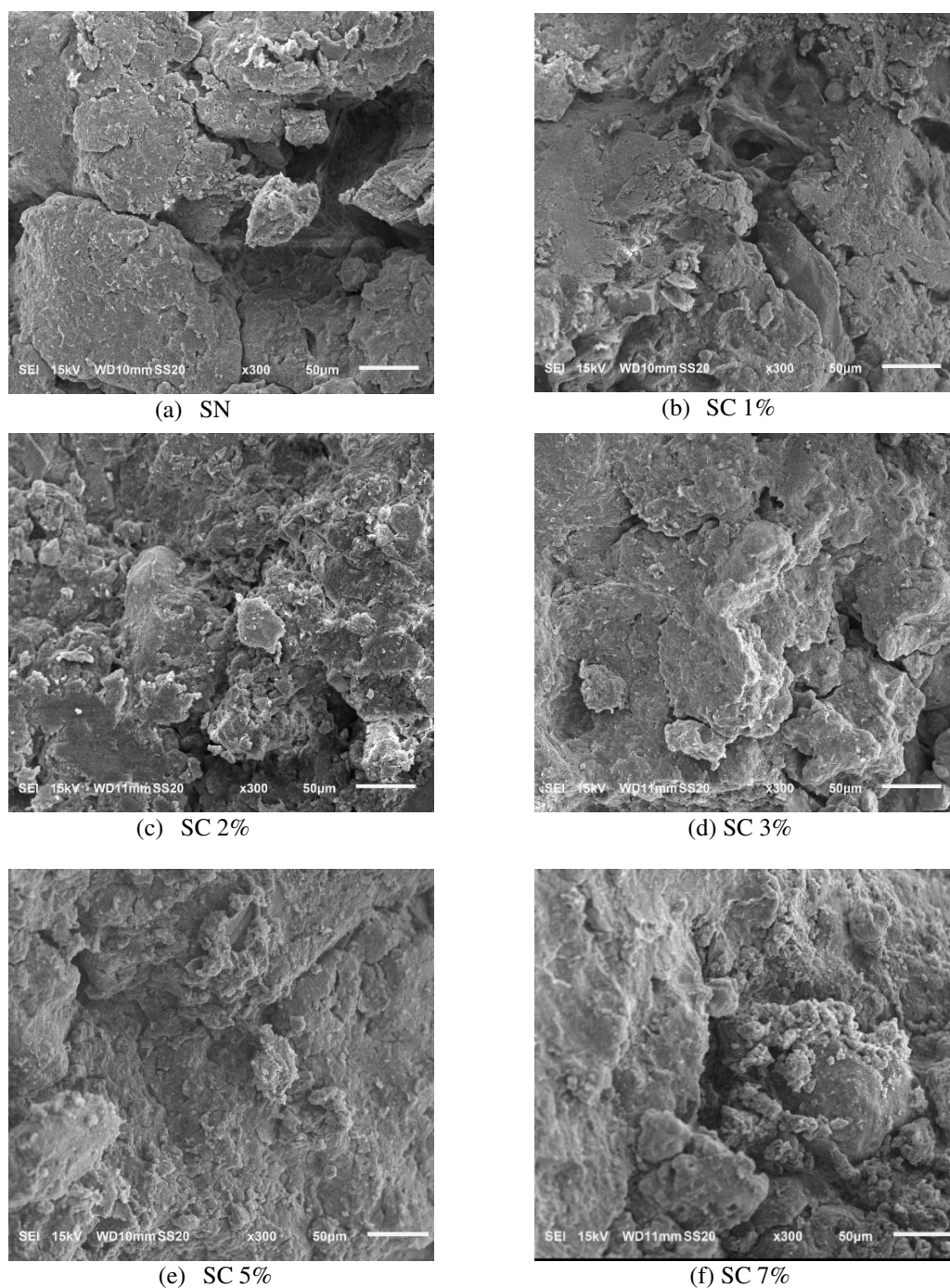


Figura 5: Micrografias das estruturas obtidas (x300): (a) solo natural; (b) solo com 1% de cimento; (c) solo com 2% de cimento; (d) solo com 3% de cimento; (e) solo com 5% de cimento; (f) solo com 7% de cimento
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Dessa forma, tem-se, a nível microestrutural, a alteração de uma estrutura na condição de solo natural com vazios de maior tamanho, que, segundo Alkiki *et al.* (2021), representam a condição de estrutura classificada como aberta, para estruturas mais densas com a adição de cimento devidas à cimentação dos grãos e ao preenchimento dos vazios entre os grãos pelos componentes cimentícios (Alkiki *et al.*, 2021).

As alterações microestruturais devidas à cimentação observadas neste trabalho foram similares às obtidas por Ranaivomanana, Razakamanantsoa e Amiri (2018). Em sua pesquisa, os autores observaram uma redução no tamanho e no volume dos macroporos, sendo estas reduções resultantes do efeito combinado do tratamento com cimentação artificial e do processo de compactação para solos finos.

Outro aspecto interessante, referente à alteração da microestrutura e possível de ser observado nas imagens da Figura 5, é a intensificação das agregações de partículas (*clusters*) que são mais expressivas quanto maior o teor de cimentação. Na imagem referente ao maior teor de cimento testado (Figura 5f), é possível observar, de forma mais significativa, a presença dessas agregações que, segundo Cruz, Rodrigues e Fonseca (2011), consistem em um sinal da influência da cimentação artificial.

Os resultados das análises do efeito da cimentação artificial nos parâmetros geotécnicos [massa específica dos sólidos (ρ_s), granulometria e limites de Atterberg (LL, LP)] são apresentados nas Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

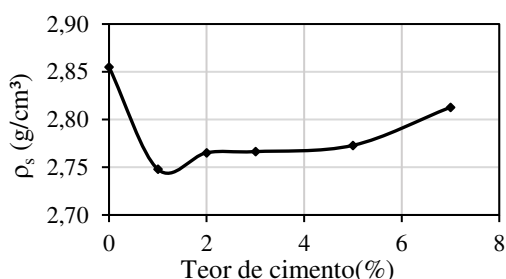


Figura 6: Variação de ρ_s com o teor de cimento nas misturas de solo com cimento
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

Analisando a Figura 6, é possível observar que a adição de cimento ao solo promoveu uma redução da massa específica dos sólidos. A massa específica dos sólidos é influenciada pela composição química e estrutura cristalina dos minerais que determinam a densidade dos grãos. Neste contexto, é possível considerar que as variações de valores na massa específica dos sólidos, devidas aos diferentes percentuais de acréscimo de cimento, são ligadas à variação da mineralogia decorrente da mistura de materiais (solo e cimento) de composições mineralógicas distintas, conforme é possível observar pelos resultados de DRX apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Assim, da mistura de materiais com densidades de grãos distintas e em proporções diferentes resultou a variação da massa específica dos grãos das misturas de solo com cimento investigadas.

Na Figura 7, é possível observar que a adição do cimento promoveu alteração na granulometria do solo argiloso natural, de forma que quanto maior o percentual de cimento adicionado mais significativa foi a mudança granulométrica.

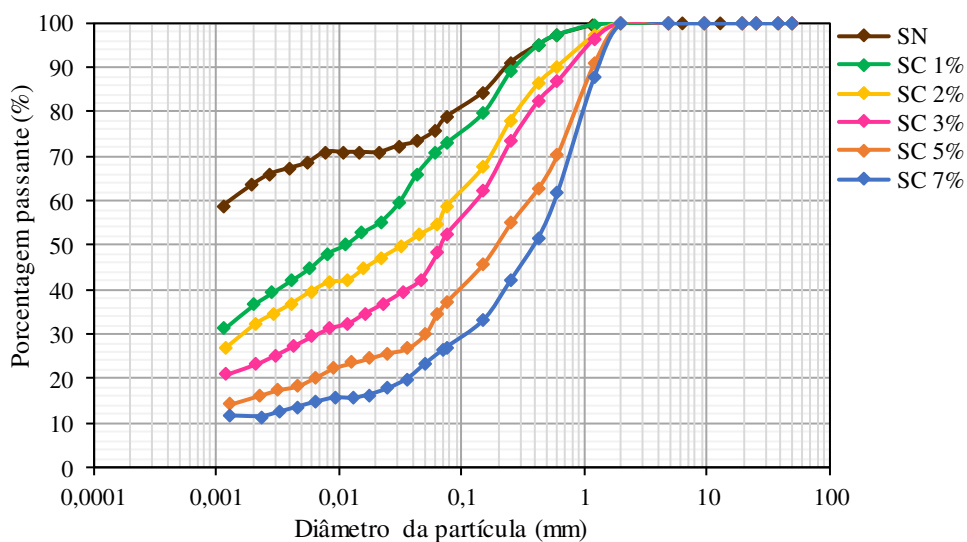


Figura 7: Variação da granulometria em função do teor de cimento nas misturas de solo com cimento
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

O deslocamento das curvas granulométricas das misturas de solo com cimento para o lado grosseiro deve-se à floculação das partículas do solo natural devida à ação do agente cimentante. Conforme já mencionado, nos testes rápidos com borrifação de fenolftaleína e uso do peagâmetro, foi observado o indicativo de alteração do meio originalmente ácido do solo para básico nas misturas. Essa elevação do pH, o aumento da concentração eletrolítica da água intersticial por íons de maior valência (Ca^{+2} e Al^{+3}) e a consequente redução da espessura da dupla camada difusa são responsáveis pelo fenômeno de floculação observado nas misturas.

O deslocamento mais significativo para os maiores teores de cimento adotados nas misturas está ligado ao fato de o crescimento do valor de pH ter se mostrado diretamente proporcional ao aumento da quantidade de cimento adicionada (Figura 4). Assim, é possível inferir que a uma maior elevação do pH nas misturas investigadas associa-se uma ocorrência mais expressiva do fenômeno de floculação.

No que se refere às variações dos tamanhos dos grãos, foi constatado um aumento do percentual de partículas do tamanho areia e uma redução do percentual de partículas do tamanho argila, em vista da elevação do percentual de cimento adicionado. As reações de floculação resultaram em aglutinação das partículas finas do solo, formando agregados com dimensões maiores, o que explica a redução percentual das partículas finas e o aumento percentual de partículas grossas (Figura 7). A formação das agregações de partículas, intensificadas com o

aumento do grau de cimentação apresentada nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 5), explicitam essa variação na granulometria.

Na Figura 8, é possível observar que as adições de cimento ao solo argiloso promoveram reduções expressivas no limite de liquidez (LL). No que se refere ao limite de plasticidade (LP), foram observadas pequenas variações em relação ao LP do solo natural, tendo-se pequenas reduções para os menores teores de cimento e pequenos incrementos para os maiores. Entretanto, considerando que essas variações foram da ordem de unidades e que, em geral, todos os valores de LP encontrados foram consideravelmente próximos, estes resultados não se mostraram indicativos de uma tendência comportamental diferenciada em vista do aumento do teor de cimento. Portanto, tais diferenças podem ser inerentes às dispersões geralmente observadas na execução do próprio ensaio.

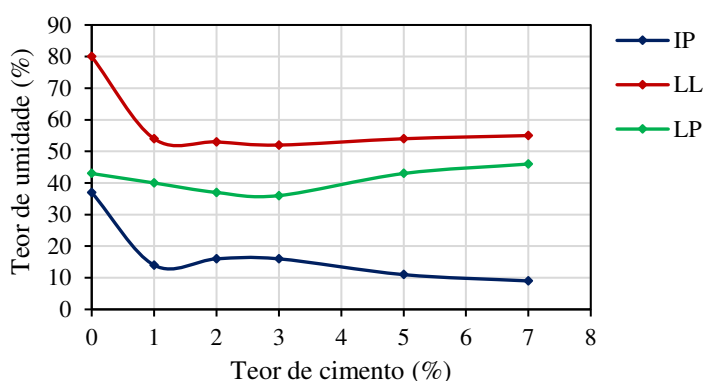


Figura 8: Variação de LL, LP e IP em função do teor de cimento nas misturas de solo com cimento
Fonte: (Adaptado de Pereira *et al.*, 2023b)

No que se refere ao índice de plasticidade (IP), percebe-se, na Figura 8, que a adição de cimento promoveu a redução deste parâmetro, conforme também observado por Mandal *et al.* (2015). Caputo (2015) aponta a granulometria e a composição mineralógica como fatores que influenciam diretamente o Índice de Plasticidade (IP) do solo. Dessa forma, o indicativo de uma redução da plasticidade do solo devida às adições de cimento pode estar mais relacionado às variações granulométricas do que às alterações mineralógicas. Considerando-se os resultados de granulometria, foi observada uma expressiva redução da fração de argila com o aumento do teor de cimento na mistura (Figura 7), que provavelmente influenciou na redução do LL e, conseqüentemente, do IP.

3.2. Análise do efeito da cimentação nas velocidades de pulsos ultrassônicos

Para ampliar a compreensão do efeito produzido pela adição da cimentação artificial ao solo argiloso e subsidiar a compreensão dos resultados obtidos nos ensaios triaxiais CIU e na obtenção da curva de retenção de água, foram realizados ensaios de pulso ultrassônico visando a obtenção de ondas longitudinais (VPU) e transversais (VSU). Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados são apresentados nas Figuras 9 e 10. É válido ressaltar que os resultados apresentados são provenientes da média de três leituras obtidas em cada corpo de prova, sendo ensaiados três corpos de prova por condição avaliada, tendo-se, portanto, como resultado o valor médio do total de nove leituras.

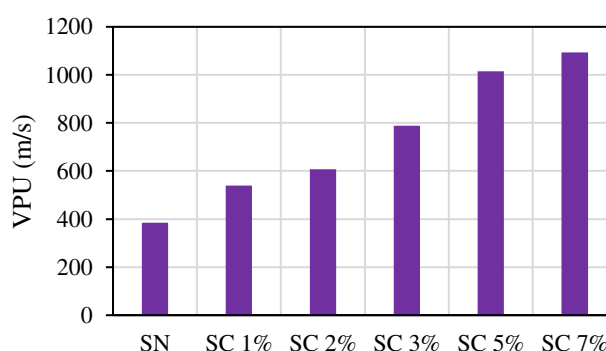


Figura 9: Velocidade da onda longitudinal (VPU) para as condições de solo natural (SN) e com distintos teores de cimento (SC)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

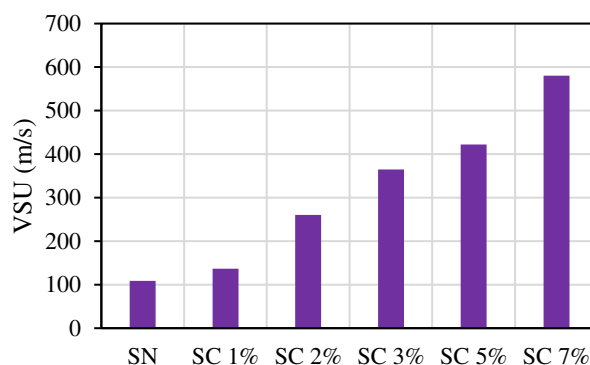


Figura 10: Velocidade da onda transversal (VSU) para as condições de solo natural (SN) e com distintos teores de cimento (SC)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através das Figuras 9 e 10, é possível observar que foram registradas diferentes velocidades de propagação do pulso ultrassônico, tanto para as ondas longitudinais quanto para as ondas transversais, nos corpos de prova de solo natural (SN) e solo com diferentes percentuais de adição de cimento (SC), sendo os valores de VPU e VSU superiores para os corpos de prova das misturas solo-cimento em todas as condições avaliadas.

Diversas pesquisas apontam o índice de vazios, a energia de compactação e a estrutura do solo como fatores que interferem na propagação do pulso ultrassônico (Vanapalli; Adem, 2014; Adem; Vanapalli, 2015; Oh; Vanapalli, 2016). Outros estudos indicam a quantidade de água, a densidade do solo e o tipo de transdutor empregado no ensaio como fatores que também interferem na velocidade de propagação do pulso ultrassônico (Ferreira *et al.*, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Champiré *et al.*, 2016; Chen; Wang; Yao, 2016; Dongqning *et al.*, 2016; Cardoso *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2017; Sarro, 2017).

Nesta pesquisa, considerando-se que foram adotados um índice de vazios de referência para a compactação dos corpos de prova e um mesmo valor de peso específico aparente seco para todas as condições avaliadas, que os corpos de prova foram todos produzidos na mesma energia de compactação a partir da compactação estática, sendo adotado o teor de umidade ótimo obtido na curva de compactação Proctor Normal, e que um único equipamento (ou seja, um transdutor para todas leituras de ondas P e outro transdutor para todas as leituras de onda S) foi empregado para a realização de todos os ensaios da técnica ultrassônica, considera-se que as variações observadas na velocidade do pulso ultrassônico estejam ligadas às diferentes estruturas obtidas devidas às variações de percentual de cimentação artificial.

Para uma melhor análise da interferência da cimentação na velocidade de propagação do pulso ultrassônico (ondas P e S), os resultados da análise proposta neste trabalho, que correlaciona VPU e VSU com o fator vazios/cimento, são apresentados através da Figura 11.

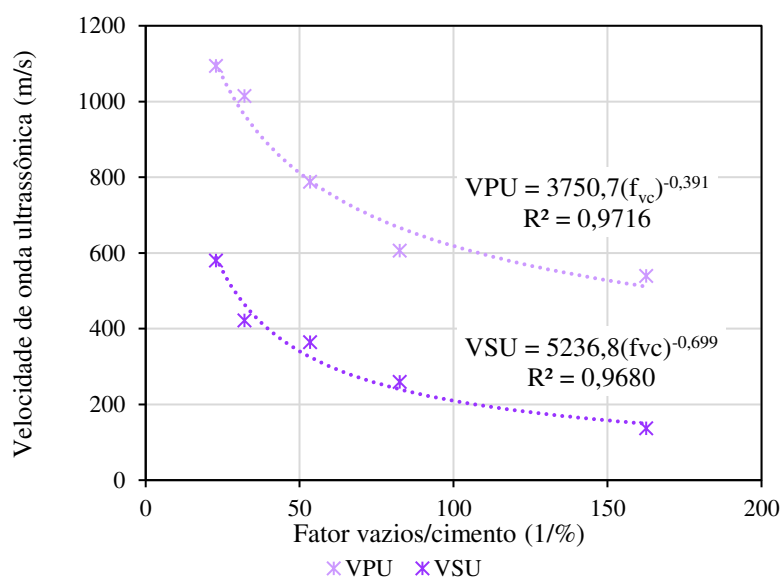


Figura 11: Relação entre a velocidade de pulso ultrassônico para ondas P (VPU) e ondas S (VSU) e o fator vazios/cimento (f_{vc})

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os resultados encontrados indicaram elevadas correlações entre os dados experimentais de velocidade obtidos para ondas P ($R^2 = 0,9716$) e para ondas S ($R^2 = 0,9680$) e o fator vazios/cimento, sendo possível perceber, através do gráfico (Figura 11), uma clara tendência de aumento nos valores de VPU e VSU com a diminuição do fator vazios/cimento (f_{vc}), tendo o modelo potencial se mostrado o mais adequado. As boas correlações obtidas entre VSU e VPU e o fator vazios/cimento apontam para a viabilidade da aplicação dessa técnica na compreensão das alterações geradas pela cimentação artificial que interferem no comportamento hidromecânico do solo argiloso.

A redução do fator vazios/cimento indica a presença de uma maior quantidade de cimentação artificial no solo associada à tendência de ganhos nos parâmetros VPU e VSU, conforme discutido nos resultados das Figuras 9 e 10.

Yesiller *et al.* (2000), em seus estudos sobre o uso da técnica ultrassônica para a determinação dos parâmetros de compactação de solos argilosos, constataram um aumento da VPU com a redução da plasticidade e do percentual de fração argila no solo. Na presente pesquisa, constatações similares foram obtidas. A relação entre valores de plasticidade e percentual de cimento, apresentada na Figura 8, permite observar que o aumento do percentual de cimento adicionado à mistura implicou em redução da plasticidade. Ao analisar-se as Figuras 9 e 10, é possível perceber que quanto maior o teor de cimento adicionado ao solo, maiores os valores de VPU e VPS obtidos, o que permite inferir uma relação de aumento nas velocidades vinculado a uma redução da plasticidade da mistura de solo com cimento.

O grau de resistência e a plasticidade dos solos dependem das ligações internas entre as partículas (Pinto, 2020). Nessa linha, a redução de plasticidade observada (Figura 8) remete a uma alteração nas ligações entre as partículas devida à adição de cimento, que promoveu alteração no caminho para propagação das ondas ultrassônicas, o que explica o aumento nos valores de VSU e VPU. Essa variação das ligações promoveu ganhos de rigidez representados pelos aumentos na VPU e VSU e estão entre as causas do aumento de resistência observados através dos resultados dos ensaios triaxiais devido à adição de cimento, que serão discutidos no item 3.4.

No que se refere à granulometria, Sarro, Assis e Ferreira (2021) verificaram uma sensibilidade do pulso ultrassônico à variação do arranjo granulométrico, havendo uma interferência direta do tamanho dos grãos. Meysan (2021) afirma que o formato e a distribuição das partículas estão dentre os principais fatores que influenciam a velocidade cisalhante. Ishihara (1996) também apontou para a influência do tamanho das partículas no valor da velocidade de onda cisalhante. Neste contexto, analisando-se a influência da granulometria e

suas variações devidas à adição de cimento nos valores de VPU e VSU, é possível correlacionar o aumento nos valores das velocidades com o deslocamento da curva granulométrica para o lado mais grosseiro (Figura 7), de forma que quanto maior o percentual de cimento adicionado maior a redução no percentual de partículas do tamanho argila e maior o aumento do percentual de partículas do tamanho areia, o que resulta das reações de floculação recorrentes nas misturas de solo argiloso com cimento.

Considerando a VSU, os resultados obtidos nesta pesquisa, a partir do ensaio ultrassônico, se mostram similares aos de Iwasaki e Tatsuoka (1977) que, através do ensaio de coluna ressonante, constataram uma redução no valor da velocidade cisalhante associada a um aumento da parcela de finos (partículas da fração argila) no solo.

A explicação para tais resultados está nas diferenças de caminhos para propagação das ondas proporcionadas por diferentes arranjos e proporções de partículas. Segundo Ye *et al.* (2004), um maior volume de sólidos e uma menor porosidade resultam em maiores valores de VPU por proporcionar um meio sólido para a propagação da onda ultrassônica. Bui (2009) observou um aumento nos valores da velocidade da onda cisalhante com o aumento do tamanho das partículas dos materiais.

Assim, as adições de cimento, ao promoverem a aglutinação das partículas finas do solo, gerando agregações com dimensões maiores, produziram um aumento no volume do meio sólido, vinculado a uma redução do índice de porosidade total do solo devida ao aumento da quantidade de partículas de areia e redução das partículas de argila, proporcionando um meio com condições de propagação mais rápida para as ondas ultrassônicas (VPU e VSU).

Miturski *et al.* (2021) afirmam que o aumento da VPU, à medida que a quantidade de aglomerante nos solos aumenta, deve-se ao efeito aglutinante das ligações produzidas entre as partículas da matriz fabricada. Mital, Kawamoto e Andrade (2019) afirmam que a microestrutura de um conjunto de partículas, considerando as agregações das partículas, contatos e os vazios associados, constitui o principal fator que influencia na velocidade das ondas cisalhantes. Ye *et al.* (2004) afirmam que um aumento de elementos sólidos conectados permite que o pulso ultrassônico se propague de forma mais rápida através de mais ligações de volumes sólidos e que fatores como bolhas de ar causam reflexo da onda ultrassônica e fazem com que seja fortemente atenuada.

Assim, o cimento, que é um material aglutinante, produz ligações entre os grãos do solo a partir de reações químicas que são mais intensificadas com o incremento do percentual de cimento adicionado e disponível para reagir. Como consequência, tem-se um aumento na conectividade das partículas sólidas do solo que permite um aumento nos valores de VPU e

VSU. Os resultados obtidos pelas análises microestruturais (Figura 5) evidenciam essas observações. Conforme já constatado por outros autores, como Luong, Destain e Mercatoris (2014) e Chen, Wang e Yao (2016), alterações na micromorfologia interferem na forma como é dada a propagação do pulso ultrassônico, influenciando na sua absorção e espalhamento.

Nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 5), percebeu-se a influência da cimentação nas alterações micromorfológicas, sendo observada uma tendência de redução no tamanho dos poros e um conseqüente aumento dos contatos entre as partículas. Maiores percentuais de cimento adotados implicaram em alteração morfológica mais significativa da estrutura dos corpos de prova.

Na imagem da microestrutura do corpo de prova de solo natural, visualmente se observam poros maiores (Figura 5a) que aqueles identificados nas imagens das microestruturas com cimento. Por exemplo, na imagem da microestrutura com 7% de cimento (Figura 5f), percebe-se a existência de poros bem menores e contatos evidentes entre as partículas, mostrando uma maior conectividade do meio sólido. Assim, as ondas emitidas nestas estruturas conseguem se propagar com velocidades superiores àquelas da estrutura de solo natural, onde as bolhas de ar presentes nos poros maiores atenuam a propagação da onda.

Outro aspecto interessante de ser observado nos resultados obtidos é referente às variações de magnitude dos valores de VPU e VSU. Apesar de apresentarem comportamentos similares (aumento nos valores de velocidade com o aumento do teor de cimento adicionado ao solo), foi possível perceber que os valores de VPU se mostram superiores aos de VSU para todas as condições avaliadas (Figura 11). Estes resultados são consistentes com os disponíveis na literatura técnica. Segundo Weidinger, Ge e Stephenson (2009), os valores típicos de VSU são de aproximadamente a metade dos valores de VPU.

A diferença destes resultados está ligada com as diferenças no formato de propagação dessas ondas. Jefferies e Shuttle (2020) explicam que, em solos, as ondas P chegam primeiro e se propagam longitudinalmente também através da água intersticial do solo. Em contrapartida, as ondas S se propagam mais lentamente no sentido transversal, não são afetadas pela saturação e se propagam somente no esqueleto sólido, estando, por isso, diretamente ligadas ao módulo de rigidez.

Considerando-se a comprovação experimental da diferença dos valores de velocidade, os formatos de propagação e a viabilidade de aplicação de cada tipo de onda como parâmetro explicativo das alterações geradas pela cimentação artificial, VPU e VSU foram empregadas para subsidiar a compreensão de distintos ensaios. Sabendo que a onda P se propaga através da água intersticial e, conforme já apresentado, que ela sofre influência do teor de umidade, a VPU

será considerada para subsidiar os resultados ligados às variações causadas pela cimentação na curva de retenção de água.

Nos ensaios triaxiais, será considerada a VSU e não a VPU, pois a onda cisalhante não é afetada pela saturação do solo (Jefferies; Shuttle, 2020). Sabendo que, para a realização dos ensaios triaxiais, os corpos de prova são primeiramente saturados, condição de saturação distinta dos corpos de prova durante a realização do ensaio ultrassônico, a VSU, que se propaga apenas no esqueleto sólido, se faz mais eficiente.

3.3. Análise do efeito da cimentação nas características de retenção de água subsidiada por avaliações da microestrutura e VPU

Os resultados do estudo do efeito da cimentação na curva de retenção de água são apresentados na Figura 12. Nesta figura, constam os dados experimentais obtidos pelas técnicas de mesa de sucção e câmara de Richards compilados de forma conjunta para a determinação da curva característica para as condições correspondentes ao solo natural (SN) e ao solo com diferentes adições de cimento (SC).

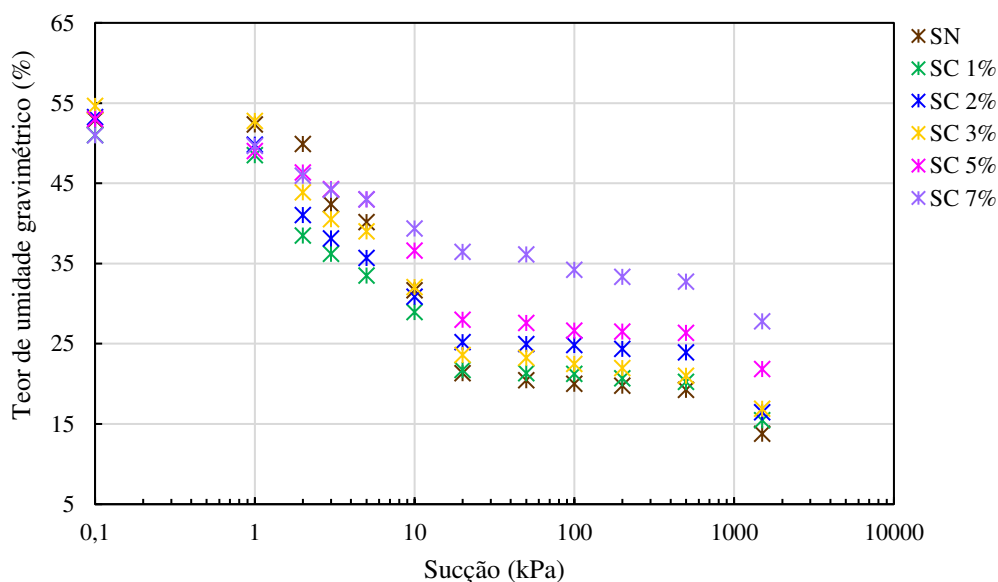


Figura 12: Resultados de ensaios para a determinação das curvas de retenção de água (SN e SC)
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os resultados indicaram que a presença de cimentação artificial influencia na retenção de água da argila tropical, conforme pode ser observada pelas diferenças nas posições dos pontos experimentais (Figura 12) e, conseqüentemente, das curvas de retenção obtidas (Figura

14 a seguir), o que remete a diferenças de valores associados entre teor de umidade gravimétrico e sucção para cada condição avaliada.

No geral, diferenças na capacidade de retenção de água são esperadas quando diferentes quantidades de um mesmo agente estabilizante (material aglutinante) são utilizadas em um solo para estabilização (Eyo; Ng'ambi; Abbey, 2022). Hoyos, Thudi e Puppala (2007) e Yang *et al.* (2011) afirmam que, com raras exceções, um aumento da quantidade de material aglutinante adicionado ao solo leva a um aumento em sua capacidade de retenção de água, considerando as mesmas condições de ensaio. Neste trabalho, constatações similares foram obtidas.

Analisando a Figura 12, percebe-se que, para maiores teores de cimento, considerando-se a análise para um mesmo nível de sucção, maiores teores de umidade gravimétrica estão associados. Ou seja, uma maior quantidade de água está presente no solo tratado com cimento do que no solo natural para uma mesma condição de sucção. Tais resultados apontam para a possibilidade de que, após um período de chuva, considerando um maciço que seja composto pelo solo estudado, ocorra retenção de uma maior quantidade de água na condição tratada com cimento do que na condição natural, o que indica a grande relevância em se avaliar a resistência não drenada, especialmente para a condição de solo tratado com cimento.

As variações dos resultados dos ensaios da curva de retenção de água, tendo em vista a variação no grau de cimentação, podem ser associadas à variação na microestrutura devida à adição de diferentes percentuais de cimentação artificial. Eyo, Ng'ambi e Abbey (2022) afirmam que a estabilização de um solo devida à adição de material aglutinante resulta em um produto misto com partículas bem aglutinadas devido ao efeito de ligação promovido pelo aglutinante.

Segundo Hoyos, Thudi e Puppala (2007), as alterações nas forças entre as partículas ocasionadas pela cimentação artificial, devidas às ligações cimentícias que promovem uma certa solidificação de cimento entre elas, restringem as variações volumétricas associadas com o processo de dessaturação (incremento da sucção), o que afeta a resposta apresentada pela curva de retenção de água. Os autores ainda afirmam que um fator que contribui para esse fenômeno é a redução da porosidade que ocorre devido ao fato de que o cimento corresponde a um novo constituinte sólido na mistura.

Nessa linha, considerando que a presença da cimentação artificial alterou a microestrutura do solo natural (Figura 5a), promovendo uma tendência de redução no tamanho dos poros maiores, formação de agregações de partículas e uma maior interconexão do meio sólido, conforme pode ser observado pelas imagens obtidas através do MEV (Figura 5b a 5f),

a alteração na capacidade de retenção de água devida à variação do grau de cimentação está ligada a essas alterações.

Essa maior interconexão do meio sólido e a redução do volume dos poros também foram comprovadas pelo aumento de VPU com o aumento do grau de cimentação (Figura 9). Dessa forma, é possível inferir que o aumento da capacidade de retenção observado está ligado à maior dificuldade de percolação da água, através de um meio interconectado e com poros menores para sua passagem, mas que permite a propagação de ondas longitudinais mais rapidamente. Ou seja, as alterações microestruturais devidas à cimentação artificial, que promoveram dificuldade à percolação de água, facilitaram a propagação da onda longitudinal ultrassônica, reduzindo dispersões e aumentando, conseqüentemente, sua velocidade.

Além disso, é possível inferir, conforme apontado por Hoyos, Thudi e Puppala (2007), que a redução do tamanho dos poros e a presença da ligação cimentícia entre partículas provoca um aumento na capacidade de armazenar água nesses poros menores e restringe as variações volumétricas devido ao aumento do nível de sucção, o que reduziu a intensidade da perda de água.

Essa restrição das variações volumétricas, consequência do aumento do nível de sucção, pode ser associada a um aumento de rigidez, sendo esse ocasionado pela cimentação constatada pelo aumento da VPU. Assim, é possível inferir que as alterações microestruturais geradas pela cimentação artificial produziram uma condição de maior rigidez, explicitada pelos incrementos da VPU resultantes da alteração das condições de ligação entre as partículas, gerando condições para aumento do nível de sucção e um conseqüente aumento da capacidade de retenção de água. Entretanto, é válido ressaltar que esse comportamento se tornou mais evidente após a pressão de entrada de ar.

A entrada de ar é definida como o ponto aproximado no qual o solo inicia o seu processo de dessaturação (Nadai; Marinho; Silva, 2023). Assim, para entender o efeito da cimentação artificial na condição inicial necessária para que o solo inicie o processo de perda de água de forma mais expressiva, foi tomado como base o parâmetro de entrada de ar, considerando os resultados dos ensaios realizados para a determinação experimental das curvas de retenção de água.

A Tabela 5 apresenta os valores de entrada de ar (ψ_1) tendo por base os resultados experimentais das curvas de retenção de água apresentadas na Figura 12, considerando todas as condições investigadas neste trabalho.

Tabela 5: Valores de entrada de ar (ψ_1) das diferentes condições avaliadas

Identificação da condição de cimentação	ψ_1 (kPa)
SN	1,55
SC 1%	0,80
SC 2%	0,72
SC 3%	0,90
SC 5%	0,70
SC 7%	0,85

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Pela análise da Tabela 5, percebe-se que os valores de entrada de ar (ψ_1) foram baixos tanto para a condição de solo natural quanto para o solo com adições de cimento. Além disso, é possível observar que os valores desse parâmetro, obtidos considerando os resultados dos ensaios com corpos de prova com cimentação artificial, foram menores que o obtido para a condição natural.

No que se refere à variação de ψ_1 entre os diferentes percentuais de cimento testados, não foi possível observar uma tendência comportamental decorrente dessa variação para o intervalo de grau de cimentação investigado, sendo os valores obtidos para as condições de solo com cimento (1%, 2%, 3%, 5% e 7%) muito próximos. Na Figura 13, apresenta-se a relação entre valores de entrada de ar (ψ_1) e teor de cimento adicionado, considerando-se a aplicação do modelo exponencial.

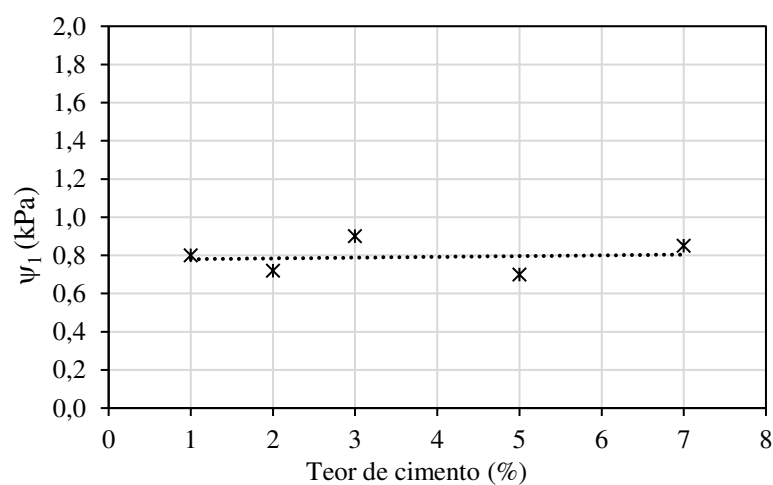


Figura 13: Associação entre valores de ψ_1 (kPa) e teor de cimento (%)
 Fonte: (Autoria própria, 2024)

A análise da Figura 13 indica a ocorrência de uma função constante entre ψ_1 e os teores de cimento testados, ou seja, o aumento do valor da abscissa (teor de cimento) não promoveu alteração no valor da ordenada (entrada de ar).

Assim, é possível inferir que a presença de cimentação artificial não influenciou de forma significativa a entrada de ar (ψ_1), sendo os valores obtidos para a condição de solo natural e com diferentes teores de cimento muito próximos. Ou seja, a presença de cimentação artificial, apesar de influenciar na forma como é dada a retenção de água, não alterou expressivamente a condição a partir da qual o solo começa a perder água de forma significativa. Constatações semelhantes foram obtidas por outros autores, como Hoyos, Thudi e Puppala (2007), que apontaram uma influência não significativa da quantidade de cimento adicionado ao solo nos valores de entrada de ar, tendo obtido pequenas variações nos valores desse parâmetro com a variação da dosagem de cimento adicionado a uma argila.

Observando-se os valores da entrada de ar (ψ_1) das condições de solo natural e com cimento (Figura 12 e Tabela 5), supõe-se que a baixa magnitude desses resultados seja indicativa da existência de formação de agregações de partículas (grumos de argilominerais) que, em função da presença da sucção, podem se comportar como grãos de areia (Sivakumar; Wheeler, 2000; Oliveira; Marinho, 2004; Benatti; Rodrigues; Miguel, 2013).

Dessa forma, a presença da cimentação artificial, ao contribuir para a formação de mais agregações, conforme pode ser observado através das imagens da microestrutura (Figura 5) e pelo deslocamento da curva granulométrica para o lado mais grosseiro (Figura 7), promoveu a redução, mesmo que de forma não expressiva e não correlacionada diretamente com o grau de cimentação, dos valores de entrada de ar (ψ_1) do solo com cimento em relação à condição natural (Tabela 5).

Para análise do formato das curvas de retenção obtidas através dos ensaios realizados, foram testados modelos tradicionalmente aceitos pela literatura técnico-científica. Os resultados obtidos através da inserção dos dados experimentais no software *SWRC Fit*, considerando-se os modelos de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), são apresentados na Tabela 6. No artigo referente ao desenvolvimento do *SWRC Fit*, Seki (2007) apresenta uma definição detalhada de todos os parâmetros apresentados na Tabela 6.

Em sequência, na Figura 14, são apresentadas as curvas de retenção de água obtidas através dos modelos testados e considerando os dados experimentais obtidos.

Tabela 6: Parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados experimentais no *SWRC Fit*

Condição	Modelo testado no <i>SWRC Fit</i>	Parâmetros do modelo avaliado	R ²	AIC
SN	van Genuchten	$\theta_s = 0,53295 / \theta_r = 0,17125$ $\alpha = 0,028078 / n = 1,9207/$	0,9825	-87,57
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,53279 / \theta_r = 0,14674$ $a = 38,652 / m = 1,2372/$ $n = 1,7750$	0,9837	-86,47
SC 1%	van Genuchten	$\theta_s = 0,51735 / \theta_r = 0,17846$ $\alpha = 0,072021 / n = 1,6249/$	0,9781	-90,30
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,51471 / \theta_r = 0,98901e-14$ $a = 11,342 / m = 0,38887/$ $n = 2,2959$	0,9811	-90,06
SC 2%	van Genuchten	$\theta_s = 0,53914 / \theta_r = 0,20279$ $\alpha = 0,085916 / n = 1,5427/$	0,9677	-86,52
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,53565 / \theta_r = 0,10e-9$ $a = 10,329/ m = 0,34614/$ $n = 2,2727$	0,9749	-87,50
SC 3%	van Genuchten	$\theta_s = 0,55231 / \theta_r = 0,18562$ $\alpha = 0,056261 / n = 1,6153/$	0,9816	-89,75
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,55138 / \theta_r = 0,12265$ $a = 18,387/ m = 0,81962 /$ $n = 1,5370$	0,9821	-88,09
SC 5%	van Genuchten	$\theta_s = 0,51823 / \theta_r = 0,23509$ $\alpha = 0,034255 / n = 1,6611/$	0,9760	-91,14
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,52367 / \theta_r = 0,24208$ $a = 69,042/ m = 2,4589 /$ $n = 1,1240$	0,9796	-91,12
SC 7%	van Genuchten	$\theta_s = 0,51509 / \theta_r = 0,25694$ $\alpha = 0,092762 / n = 1,2543/$	0,9776	-101,54
	Fredlund e Xing	$\theta_s = 0,51347 / \theta_r = 0,10e-9$ $a = 12,366/ m = 0,23255 /$ $n = 1,3791$	0,9795	-100,62

Fonte: (Autoria própria, 2024)

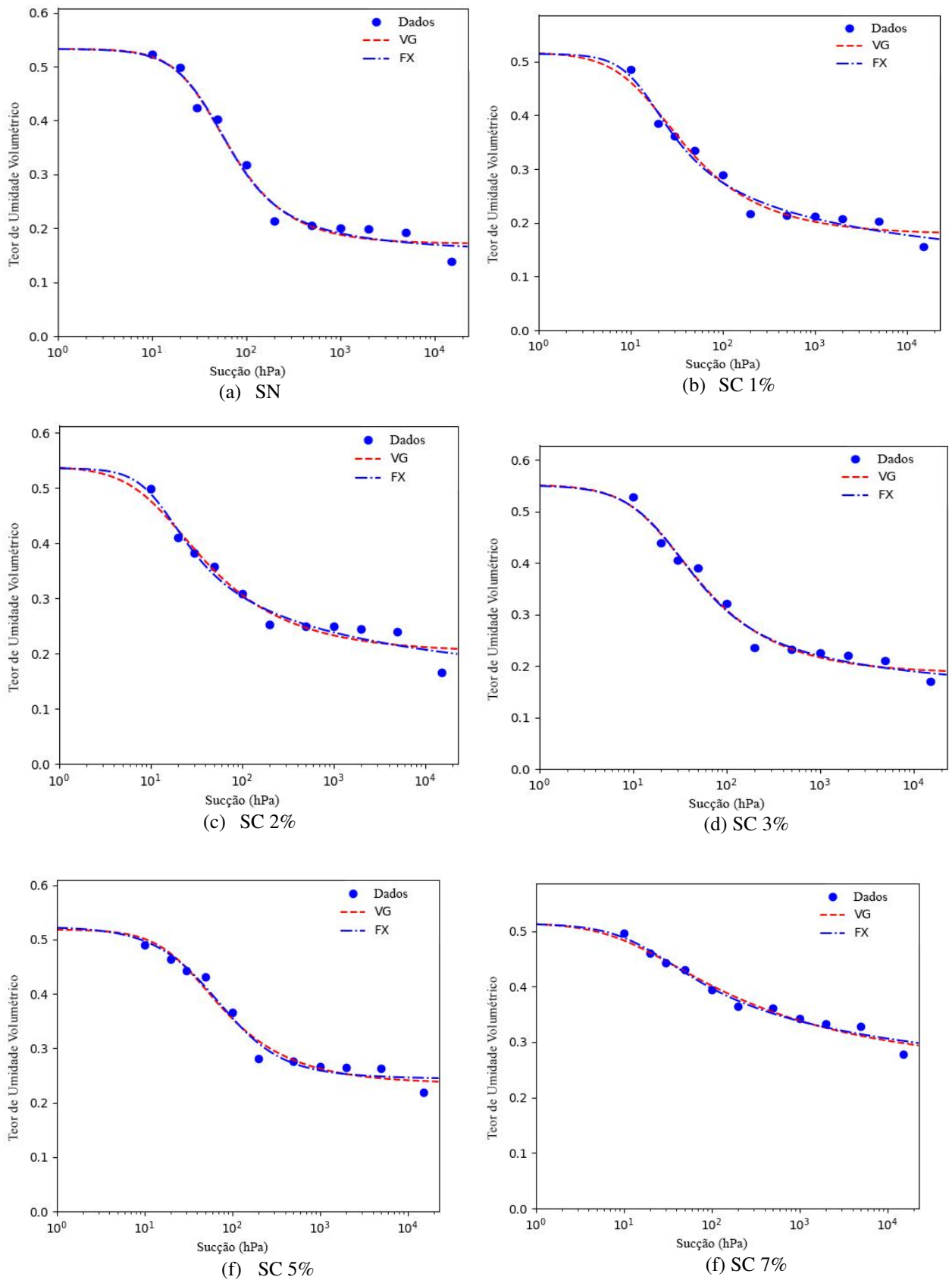


Figura 14: Curvas de retenção de água obtidas pela aplicação dos modelos de van Genuchten (VG) e Fredlund e Xing (FX): (a) SN; (b) SC 1%; (c) SC 2%; (d) SC 3%; (e) SC 5%; (f) SC 7%

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando-se a Tabela 6, é possível observar que todos os dados experimentais obtidos apresentaram ajuste satisfatório pelos modelos de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), sendo os valores de $R^2 > 0,9677$.

Ao se avaliar de forma comparativa os resultados de cada método, observa-se que, considerando o R^2 , o modelo de Fredlund e Xing (1994) apresentou o melhor ajuste para os dados experimentais obtidos, tendo para esse modelo os maiores valores de R^2 para todas as condições investigadas. Entretanto, ao se considerar o AIC, o modelo de van Genuchten (1980) apresentou os menores valores, para todas as condições, com exceção para os resultados da condição de solo com 2% de cimento, o que indica uma maior simplicidade em sua aplicação, o que, pela análise por AIC, é indicativo de maior qualidade do modelo (Seki, 2007).

Além disso, é válido ressaltar que a diferença de valores de R^2 e AIC para todas as condições testadas em ambos os modelos foi muito baixa, podendo ser considerada insignificante. Dessa forma, é possível afirmar que tanto o modelo de van Genuchten (1980) quanto o de Fredlund e Xing (1994) se mostraram adequados para o tratamento dos dados experimentais dessa pesquisa.

No que se refere ao formato apresentado pelas curvas de retenção, de forma geral, se observados comparativamente os formatos (Figuras 12 e 14) das condições de solo natural e com cimento, percebe-se que a adição de cimento teve efeito insignificante. Constatação similar foi obtida na pesquisa de Alkiki *et al.* (2021).

Avaliando-se as curvas de retenção de forma comparativa, observa-se que, com o aumento do teor de cimento, houve um deslocamento dessas curvas de forma gradativa para cima, em relação à do solo natural. Porém, observa-se que a curva correspondente ao teor de 7% de cimento ficou bem acima das demais (Figura 12).

Em sua pesquisa, Yang *et al.* (2011) indicaram o aumento na retenção de água, visualizado pelo achatamento da inclinação da curva de retenção de água, à medida que quantidades crescentes de cal ou cinzas volantes foram adicionadas ao solo estabilizado. Neste trabalho, também é possível observar o aumento na capacidade de retenção de água pelo achatamento da curva, sendo essa alteração mais expressiva para o teor de 7% de cimento (Figura 14f).

Segundo Aldaood (2020), este tipo de comportamento pode ser atribuído às elevadas forças de capilaridade e adsorção resultantes de uma estrutura do solo classificada como fina. Assim, o efeito da cimentação, ao promover na microestrutura uma tendência de redução no tamanho dos macroporos e aumento no número de poros menores, gerou essa condição de estrutura que promoveu um aumento das forças de capilaridade, sendo esta alteração mais

expressiva quanto maior o teor de cimento adicionado (como observado nos resultados de MEV, Figura 5). Jiang *et al.* (2019) também explicam que a adição de cimento pode contribuir para a melhoria das propriedades microestruturais do solo, de maneira que a curva granulométrica seja alterada de forma a melhorar a performance de retenção de água do solo tratado com cimento.

Esse resultado torna-se mais evidente para valores de sucção maiores que 10 kPa, onde percebem-se menores perdas de água (redução de umidade) com o aumento da sucção para as condições de solo com 5% e 7% de cimento (Figura 12). Esse comportamento de redução da perda de água com o aumento da sucção, associado ao teor de cimento adicionado, também foi observado por outros autores como Alkiki *et al.* (2021). Dessa forma, o aumento da capacidade de retenção de água associado ao grau de cimentação indica a relevância de considerar-se parâmetros não drenados em análises de estabilidade que envolvam a condição de solo tratado com cimento, considerando que essa alteração influenciará na distribuição do excesso de poropressão em uma dada seção de um maciço.

Korf, Prietto e Consoli (2017), estudando o comportamento hidráulico de uma argila compactada, com e sem cimentação artificial, obtiveram resultados indicando que a retenção de água por absorção aumentou com o aumento do pH das misturas. Nesta linha, considerando que a adição de cimento ao solo natural promoveu aumento de pH (Figura 5), sendo este mais expressivo quanto maior o teor de cimento adicionado, é provável que os teores de 5% e 7% apresentaram uma maior capacidade de absorção de água, o que ajuda a explicar também o porquê de as curvas dessas misturas indicarem maiores teores de umidade, ou seja, maior quantidade água retida no solo, mesmo com aumento da sucção, quando comparadas aos demais teores de cimento.

Essas constatações contribuem para a relevância de análises envolvendo pH em solos cimentados, pois, além de ser uma forma indicativa da ocorrência de reações entre solo e cimento devida à alteração do meio para básico (Figuras 3 e 4), auxiliam na compreensão da variação da capacidade de retenção de água com o grau de cimentação.

Conforme previamente discutido, o aumento da interconexão do meio sólido foi capaz de gerar um aumento na capacidade de retenção de água nas misturas solo-cimento, tendo-se uma redução na perda de água com o aumento da sucção. Essa intensificação da interconexão do meio sólido também explica as propagações de onda de forma mais rápida mediante aplicação da técnica ultrassônica. Assim, maiores valores de VPU são obtidos para condições em que se tem mais ligações entre as partículas, devido à geração de um meio sólido interconectado mais expressivo.

Partindo-se das premissas de que o teor de umidade apresentado pelo solo influencia na condição de sucção apresentada (equilíbrio do meio trifásico do solo) e que o teor de umidade influencia nos valores de VPU (Lencis; Udriš; Korjakins, 2013; Okazaki *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023), considerando-se uma possível influência do nível de sucção na propagação da onda longitudinal, foi avaliada uma possibilidade de correlação entre os parâmetros de sucção e VPU.

Para tal, foi considerado como referência o teor de moldagem adotado para os corpos de prova e, a partir desse valor, obtido o valor de sucção associado através da curva de retenção de água (Figura 12). É válido ressaltar que o teor de umidade de moldagem foi único para todos os corpos de prova ensaiados neste trabalho (31,9%), ou seja, para os corpos de prova destinados à determinação da curva de retenção e também para os que foram submetidos ao ensaio ultrassônico. Na Figura 15, é apresentado o resultado da correlação entre os valores de VPU e sucção.

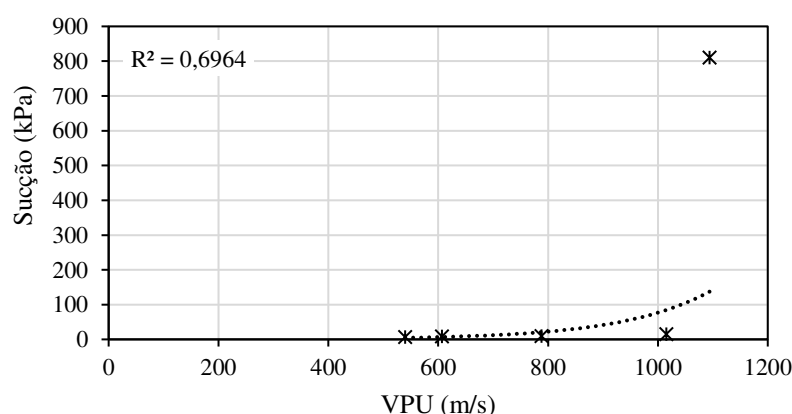


Figura 15: Correlação entre sucção e VPU para um mesmo teor de umidade de referência
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da Figura 15, é possível perceber que, apesar da dispersão dos dados, foi observada uma tendência de se correlacionar maiores valores de sucção com maiores valores de VPU, quando considerado um mesmo teor de umidade de referência. O modelo que apresentou melhor correlação foi o exponencial, sendo obtido um valor razoável de R^2 .

A tendência obtida indica que a alteração microestrutural produzida pelas ligações cimentícias produziu um meio mais rígido devido ao aumento no grau de cimentação, que pode ser avaliado por maiores valores de sucção e VPU, para uma mesma quantidade de água presente na mistura (teor de umidade).

3.4. Análise do efeito da cimentação no comportamento mecânico do solo subsidiada por avaliações da microestrutura e da VSU

Para melhor compreensão do efeito da cimentação no comportamento mecânico do solo, os ensaios triaxiais isotropicamente adensados e não drenados (CIU) foram realizados com seis níveis de tensão confinante em corpos de prova com seis distintas condições de cimentação artificial (sem cimentação e com cinco graus de cimentação).

3.4.1. Análise da influência da cimentação no comportamento tensão-deformação e excesso de poropressão

Considerando os resultados obtidos da etapa de adensamento do ensaio, na Figura 16, é apresentada a relação entre deformação volumétrica ($\Delta V/V_0$) e teor de cimento (%) presente em cada condição, considerando as diferentes tensões de adensamento adotadas.

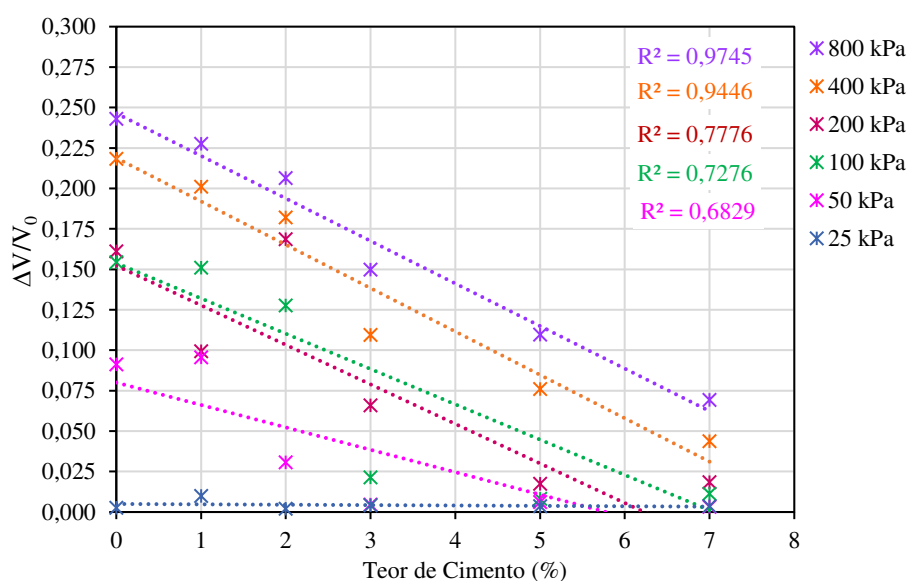


Figura 16: Deformação volumétrica na etapa de adensamento *versus* teor de cimento
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através do gráfico, é possível perceber uma relação entre as deformações volumétricas e o teor de cimento presente na mistura, de forma que uma tendência de redução de deformação com o aumento do grau de cimentação pode ser observada.

Além disso, é possível notar uma influência da tensão de adensamento nessa tendência, de forma que os resultados para as maiores tensões de adensamento (400 kPa e 800 kPa) apresentaram melhores correlações ($R^2 > 0,9445$ e $R^2 > 0,9745$). Para a menor tensão de

adensamento (25 kPa), foi observada uma tendência de constância, não sendo observado variação nos valores de deformação volumétrica para os diferentes teores de cimento testados. Essa variação da influência da tensão pode ser explicada pelo fato de que, sob ação de uma tensão de adensamento baixa, baixas deformações já eram esperadas devidas à baixa sollicitação, não sendo possível observar, de forma mais expressiva, o efeito da cimentação artificial na deformação volumétrica dos corpos de prova. Entretanto, quando adensados a maiores tensões, os corpos de prova se deformaram mais e o efeito da cimentação artificial em promover resistência às deformações se mostrou mais evidente.

Considerando o conceito da Resistência dos Materiais de que a rigidez de um material pode ser definida como a resistência à deformação (Hibbeler, 2010), pode-se associar a tendência observada de redução da deformação volumétrica, com o aumento do grau de cimentação artificial, à maior rigidez promovida pela adição de cimento nas misturas. Clough *et al.* (1981) afirmam que a rigidez dos solos é sensível à quantidade e à natureza do agente cimentante. Nessa linha, como nesta pesquisa foi utilizado um único agente cimentante e como o solo adotado possui comportamento laterítico que possibilita a ação do cimento como um aditivo que promove ganhos de resistência e rigidez, a variação de rigidez pode ser associada diretamente à variação da quantidade de cimento adicionado.

Como forma de avaliar o efeito da cimentação na rigidez, na Figura 17, é apresentada a relação entre deformação volumétrica ($\Delta V/V_0$), considerando que o aumento de rigidez causado pela cimentação afeta claramente o comportamento volumétrico do solo (Lade; Overton, 1989), e a velocidade de onda cisalhante obtida através da técnica ultrassônica (VSU), sendo a velocidade cisalhante considerada como medida indireta da rigidez de um material (Hussien; Karray, 2016).

Os resultados apresentados na Figura 17 associam os valores de deformação volumétrica para cada condição de cimentação testada, sendo diferenciados os resultados obtidos para cada nível de tensão de adensamento, com os valores de VSU obtidos em corpos de prova em mesma condição de cimentação. Neste trabalho, a VSU é considerada como forma de se avaliar a rigidez inicial apresentada pelo solo na condição natural e com os diferentes graus de cimentação, quando submetido aos ensaios CIU.

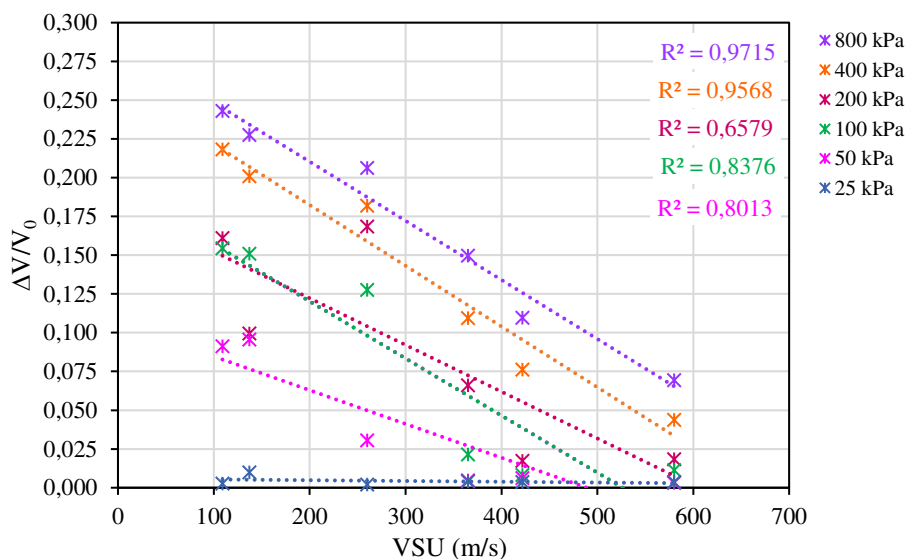


Figura 17: Deformação volumétrica na etapa de adensamento *versus* VSU
 Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando-se a Figura 17, é possível observar uma associação de menores valores de deformação com maiores valores de VSU, tendo por base os resultados obtidos para cada condição de cimentação, nos quais maiores teores de cimento foram associados a menores deformações volumétricas (Figura 16) e a maiores valores de VSU (Figura 10). Os resultados da Figura 17 indicaram boas correlações entre os parâmetros. No caso dos resultados para a tensão de adensamento de 25 kPa, foi observada uma tendência de constância, em que os diferentes valores de VSU, provenientes de ensaios com diferentes condições de cimentação artificial, se mostraram associados a um mesmo valor de deformação volumétrica. Isso indica, de forma indireta, a não ocorrência de associação entre aumento no teor de cimento e alterações nos valores de deformação volumétrica, para o menor nível de tensão testado (25 kPa).

Assim, é possível associar um aumento de rigidez devido à adição de cimento que pode ser observado por uma maior resistência à deformação e uma maior VSU, considerando a VSU como uma medida da rigidez inicial dos corpos de prova. A explicação para esse ganho de rigidez está nas alterações microestruturais geradas pelas reações do cimento nas misturas.

Jing *et al.* (2022) afirmam que as alterações que ocorrem nos poros microscópicos do solo durante o processo de hidratação do cimento interferem no desenvolvimento da resistência dos materiais cimentados. Segundo os autores, as reações de hidratação do cimento aumentam a resistência dos solos através das ligações cimentícias entre as agregações de partículas de argila e através do preenchimento e redução dos espaços entre os poros, devidos aos produtos de hidratação do cimento.

Nessa linha, é possível constatar que as alterações microestruturais observadas através do ensaio de MEV (Figura 5) explicam o ganho de rigidez observado. Além disso, conforme

previamente apresentado, a alteração das ligações entre partículas devida à cimentação artificial, que gera ganhos de resistência e rigidez, também foi identificada pela redução da plasticidade do solo (Figura 8).

Percebeu-se a alteração de uma microestrutura com maiores macroporos e aspecto mais aberto na condição de solo natural (Figura 5a) para uma microestrutura alterada pelas ligações cimentantes, com os poros maiores preenchidos pelos produtos de hidratação e presença de agregações de partículas mais expressiva devida ao efeito da cimentação artificial, sendo tais alterações mais significativas quanto maior o teor de cimento da mistura (Figura 5f).

Com base nessas alterações microestruturais, é possível constatar que as ligações cimentícias, através da formação da matriz cimentícia no solo, criaram condições para o surgimento de uma microestrutura mais resistente e rígida, apresentando um esqueleto sólido mais interconectado, que se mostrou menos deformável e gerou menores dispersões na propagação da onda cisalhante, permitindo que essa propagação fosse mais rápida, aumentando consequentemente os valores de VSU.

No que se refere aos resultados obtidos na etapa de cisalhamento dos ensaios triaxiais adensados e não drenados (CIU) realizados nas condições de solo com e sem a adição de cimentação artificial, são apresentados, nas Figuras 18 a 23, os gráficos tensão desviadora *versus* deformação axial ($\sigma_d \times \epsilon_a$) e excesso de poropressão *versus* deformação axial ($\Delta u \times \epsilon_a$).

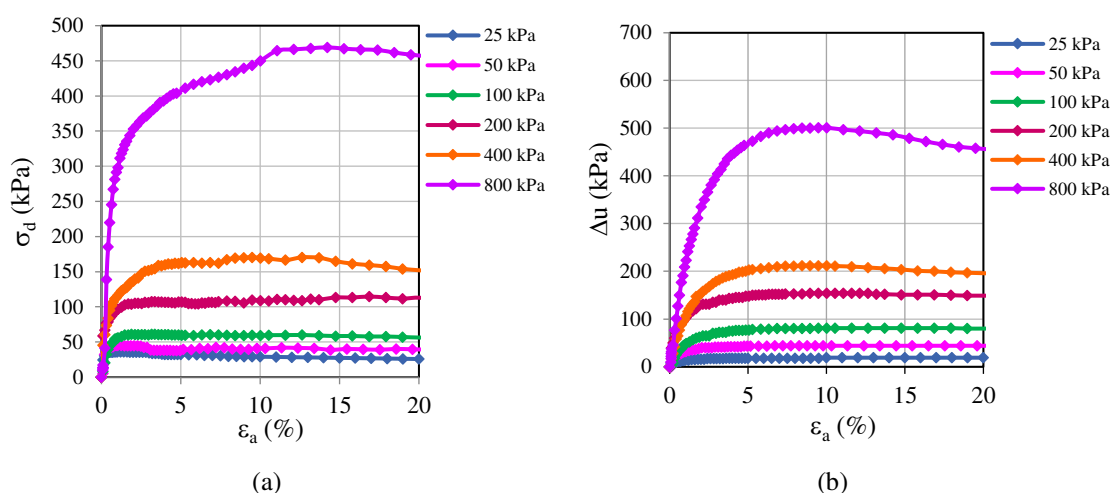


Figura 18: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SN: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

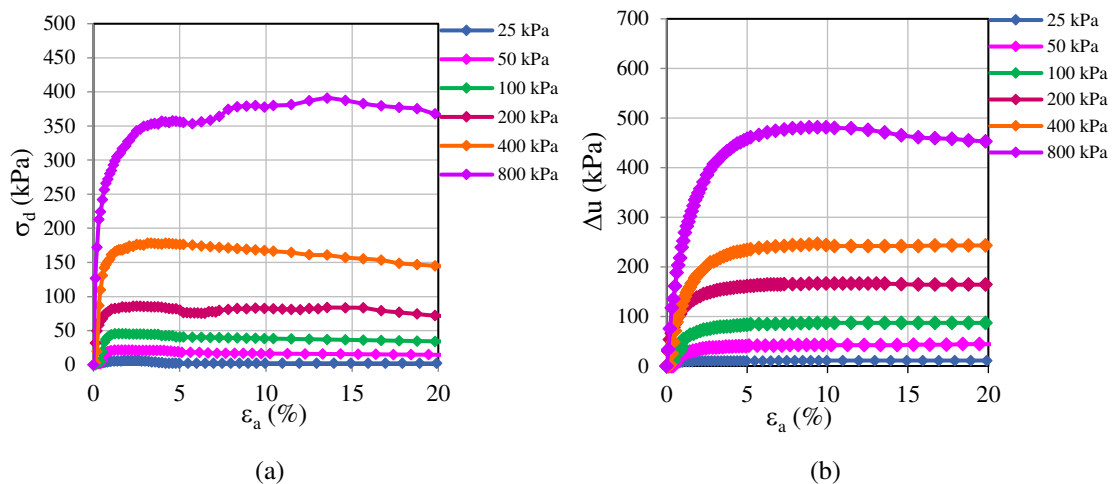


Figura 19: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SC 1%: (a) $\sigma_d \times \varepsilon_a$; (b) $\Delta u \times \varepsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

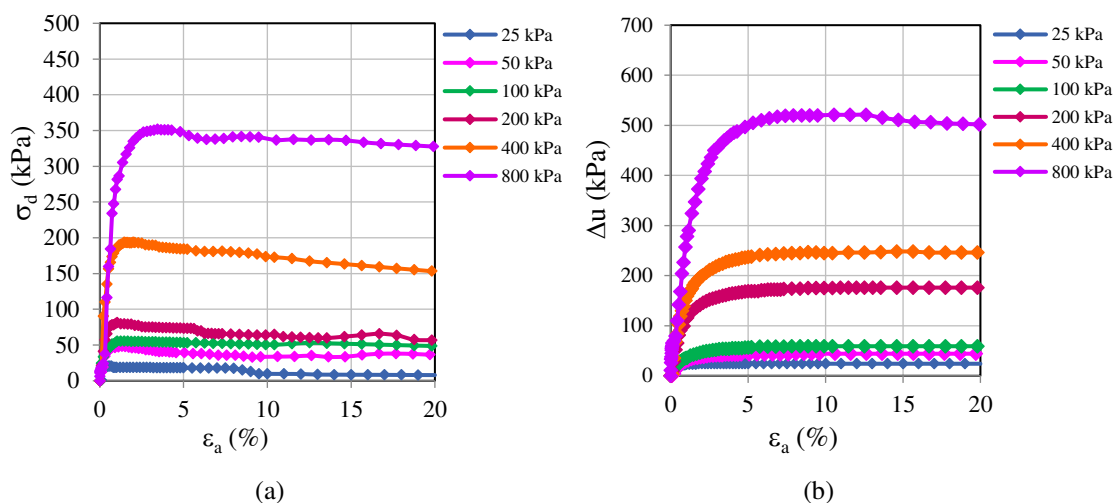


Figura 20: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SC 2%: (a) $\sigma_d \times \varepsilon_a$; (b) $\Delta u \times \varepsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

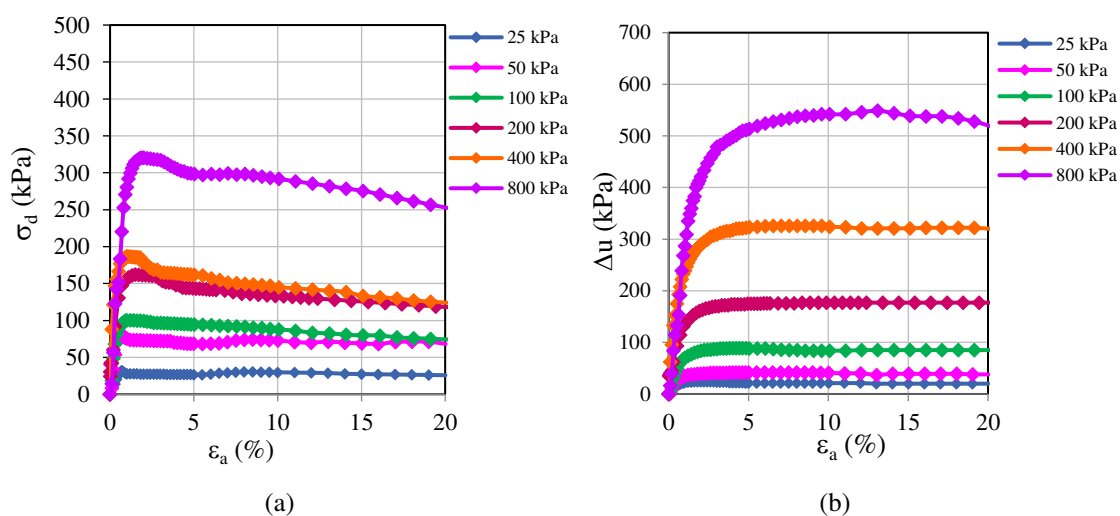


Figura 21: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SC 3%: (a) $\sigma_d \times \varepsilon_a$; (b) $\Delta u \times \varepsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

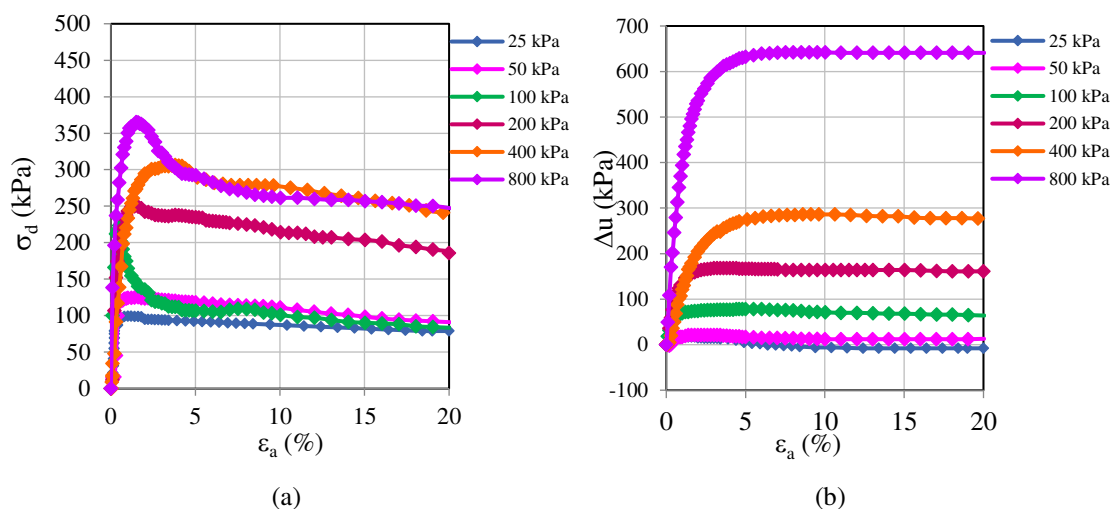


Figura 22: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SC 5%: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

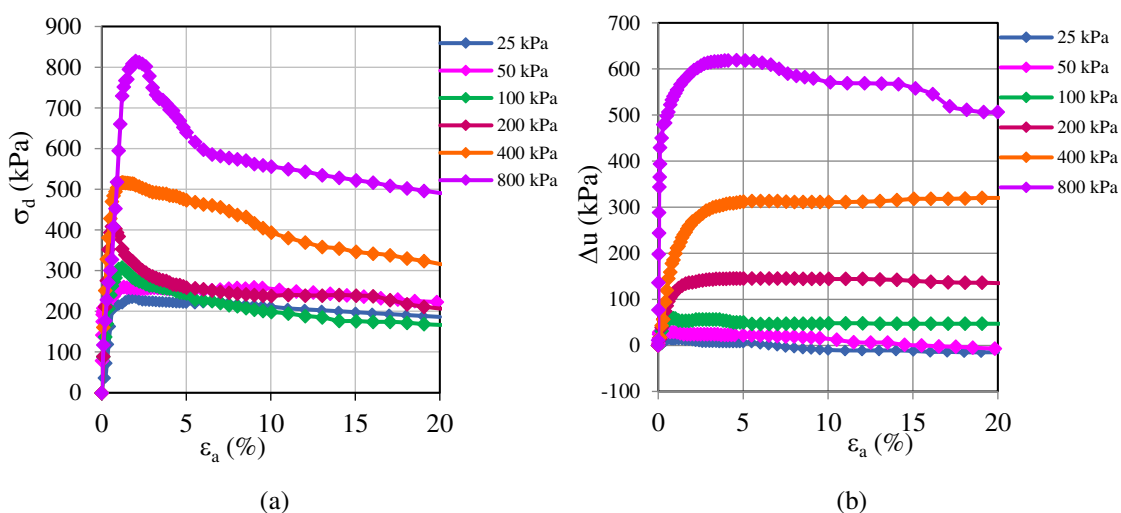


Figura 23: Gráficos dos ensaios triaxiais CIU realizados sobre corpos de prova SC 7%: (a) $\sigma_d \times \epsilon_a$; (b) $\Delta u \times \epsilon_a$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da análise das Figuras 18 a 23, é possível observar que as curvas tensão-deformação, obtidas a partir dos ensaios CIU realizados, apresentaram um aumento da tensão desviadora até um valor máximo, que pode ser associado com a ruptura do corpo de prova, caindo posteriormente para um patamar, indicando ocorrência de deformação sem aumento de tensão. As curvas de excesso de poropressão indicaram um aumento de poropressão no início do ensaio e uma posterior estabilização. Boszczowski (2008) observou comportamentos similares em sua pesquisa.

É reconhecida, pela comunidade técnico-científica, a dependência do comportamento tensão-deformação de solos estabilizados com cimento em relação ao grau de cimentação e à tensão de adensamento (Leroueil; Vaughan, 1990; Yajima; Nagaoka; Tanizaki, 1997).

Observando-se, de forma comparativa, os gráficos tensão desviadora *versus* deformação axial das Figuras 18a a 23a, é possível fazer algumas análises ligadas à dependência desses fatores.

Avaliando-se o comportamento de σ_d para valores de $\varepsilon_a < 5\%$, é possível perceber que, com o aumento do teor de cimento, a tensão de pico torna-se mais evidente no regime de pequenas deformações. Para os gráficos dos materiais com adições de 1% e 2% de cimento, não se nota tensão de pico ($\sigma_{dm\acute{a}x}$) tão evidente, sendo o comportamento tensão-deformação apresentado muito similar ao do solo em condição natural. Para os corpos de prova com 3% de cimento, já é possível identificar a presença da tensão de pico ($\sigma_{dm\acute{a}x}$), sendo esta ainda mais evidente e com valores mais elevados para os teores de 5% e 7%. Além disso, observa-se que o aumento da tensão de adensamento faz com que essa tendência seja mais evidente, sendo a tensão de pico ($\sigma_{dm\acute{a}x}$) mais evidente para os ensaios realizados em corpos de prova adensados com tensão de 800 kPa.

Conforme discutido previamente nos resultados da etapa de adensamento do ensaio CIU (Figuras 16 e 17), a explicação para as alterações de comportamento quanto à resistência, rigidez e deformação está nas mudanças na microestrutura devidas à adição de cimento, sendo tais explicações também válidas para a etapa de cisalhamento do ensaio.

Nas imagens obtidas através da aplicação do MEV (Figura 5), observa-se que o aumento do teor de cimento adicionado ao solo promove um aumento no grau de cimentação entre as partículas, tendo-se a presença mais expressiva de ligações cimentícias que implicam em uma intensificação das agregações e uma conseqüente redução do tamanho dos macroporos e maior presença de microporos. Tais alterações se mostraram mais expressivas para o teor de 7% de cimento (Figura 5f), o maior percentual testado neste trabalho. Essas alterações promovem maior resistência às microestruturas cimentadas frente a aplicação do carregamento axial durante o ensaio, comparativamente à microestrutura apresentada pelo solo natural.

Em sua pesquisa, Mengue *et al.* (2017) concluíram que a estrutura do corpo de prova tratado com cimento tornou-se mais compacta do que a estrutura dos corpos de prova naturais do solo quando o teor de cimento aumentou. De acordo com Alkiki *et al.* (2021), a investigação de corpos de prova de solos cimentados revelou alterações microestruturais resultantes da transformação de estruturas porosas de corpos de prova de solo natural para estruturas mais densas e com menor formação de poros devidas à adição de cimento. Jing *et al.* (2022) afirmam que, como resultado das reações de cimentação, um esqueleto sólido é formado e os poros são preenchidos pelos produtos de hidratação e reduzidos de tamanho, causando uma melhoria no comportamento mecânico quanto à resistência do material.

Nessa linha, é possível inferir que essa maior densificação gerada pela cimentação alterou o comportamento apresentado pelo solo na condição natural, cuja curva tensão-deformação mostrou-se típica de uma argila normalmente adensada, para uma curva típica de argila pré-adensada, no qual observa-se um valor bem definido para a tensão desviadora de pico no regime de pequenas deformações. Comportamentos similares foram observados por Huang e Airey (1993). Os autores observaram que, no comportamento não drenado, se a cimentação aumenta a rigidez e a resistência de pico também aumenta, a deformação axial na resistência de pico diminui, a amostra se torna mais frágil e o excesso de poropressão aumenta ligeiramente.

Para ilustrar o aumento de rigidez devido à cimentação e seu efeito nas respostas de deformação axial quando atingida a resistência de pico, foram considerados os resultados dos ensaios realizados com tensão de adensamento de 800 kPa, devido ao fato do pico de $\sigma_{dm\acute{a}x}$ (resistência de pico) ter se mostrado mais evidente para todas as condições de cimentação investigadas nesta condição, o que facilita a seleção do valor de deformação (ϵ_a) associado a $\sigma_{dm\acute{a}x}$. Estes resultados, considerando que cada ponto é referente ao resultado do ensaio com cada uma das seis condições de cimentação avaliadas, foram correlacionados com a VSU obtida para a condição de cimentação (Figura 10), sendo apresentados na Figura 24.

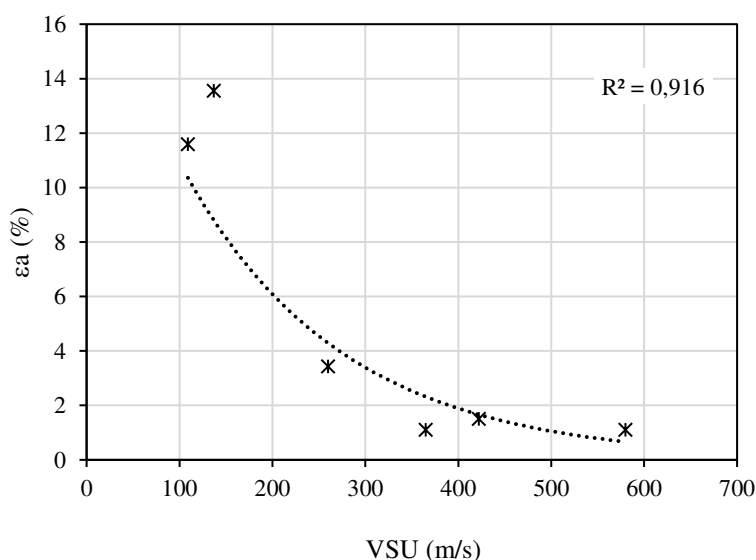


Figura 24: ϵ_a (%) associada com $\sigma_{dm\acute{a}x}$ versus VSU
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da Figura 24, é possível observar que o modelo exponencial apresentou um bom ajuste ($R^2 = 0,9160$) para os resultados de deformação axial associada à tensão desviadora máxima, nos ensaios CIU adensados com 800 kPa, com os valores de VSU obtidos pela técnica

ultrassônica. O gráfico permite observar que a relação entre os valores de deformação axial de pico e VSU são inversamente proporcionais. Assim, o ganho de rigidez associado à cimentação artificial pode ser explicado por reduções de deformação axial e aumento de VSU de forma conjunta.

Avaliando-se as Figuras 18a a 23a, foi possível perceber que, após o valor máximo de tensão desviadora, ocorre uma redução na tensão que é representativa da quebra da estrutura produzida pela cimentação (Airey; Fahey, 1991; Leroueil; Hight, 2003; Rosa; Consoli; Heineck, 2006), tendo tal comportamento se mostrado mais evidente para os ensaios nos corpos de prova com 7% de cimento (o maior teor avaliado nesta pesquisa), na tensão confinante de 800 kPa, o que reforça a influência expressiva do grau de cimentação e da tensão confinante no comportamento tensão-deformação de misturas solo-cimento, conforme já apresentado. Essa tendência comportamental de aumento na tensão desviadora máxima com os aumentos do percentual de cimentação e da tensão confinante também foi observada por autores como Kasama, Ochiai e Yasufuku (2000).

Outra evidência dessa alteração de comportamento produzida pela presença da cimentação artificial é a ocorrência de poropressão negativa para os ensaios com as menores tensões confinantes nos corpos de prova com os maiores percentuais de cimento testados (5% e 7%), conforme pode ser observado nas Figuras 22b e 23b. Esse fato pode ser explicado tendo em mente que, toda vez que durante um carregamento não drenado houver tendência de aumento de volume do corpo de prova, a impossibilidade de absorver água para satisfazer esse aumento de volume tem como consequência a geração de excesso de poropressão negativa.

A cimentação, ao produzir uma microestrutura mais resistente e rígida, sendo essa mais expressiva para os maiores teores de cimento, resultou em misturas com comportamentos similares a solos na condição pré-adensada. Boszczowski (2008) afirma que solos com comportamento “pré-adensado” geram excesso de poropressão negativa durante o cisalhamento, indicando que a tensão atuante no material está abaixo da tensão de cedência. Dessa forma, como as misturas com 5% e 7% apresentaram um comportamento “pré-adensado” mais expressivo, com a tensão desviadora máxima de pico maior e uma condição de pico bem definida, excessos de poropressão negativa também são esperados.

Segundo Filho e Consoli (2023), a baixas tensões de adensamento, a resposta no cisalhamento é predominantemente devida ao efeito da cimentação. Assim, como o excesso de poropressão negativa foi observado apenas para baixas tensões, pode-se inferir que esse comportamento é resultado de uma condição em que o efeito da cimentação governou o comportamento tensão-deformação das misturas.

Ainda é possível observar, nas Figuras 22b e 23b, que, com o aumento da tensão de adensamento, o excesso de poropressão muda de negativo para positivo e a resistência de pico aumenta ($\sigma_{dm\acute{a}x}$). Huang e Airey (1993) observaram comportamento similar em sua pesquisa, justificando que o aumento da rigidez influencia nas alterações de comportamento quanto à tensão e ao excesso de poropressão.

Entretanto, é válido ressaltar que, exceto para a condição de excesso de poropressão negativa (Δu) para baixas tensões e para o fato de Δu ter sido maior para esses teores (5% e 7%), para os demais teores o comportamento de Δu foi similar.

Conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras (19b a 21b), as curvas foram similares, atingindo valores próximos aos apresentados pelo resultado dos ensaios de corpos de prova na condição natural (Figura 18b), podendo-se associar o aumento de Δu com o aumento de σ_d . Considerando que os baixos teores de cimento (1%, 2% e 3%) não geraram ganhos de resistência expressivos e, portanto, que os valores de σ_d atingidos foram próximos aos obtidos na condição natural, é coerente que o excesso de poropressão também tenha apresentado comportamento similar.

Essa análise vai ao encontro com o afirmado por Huang e Airey (1993) de que a cimentação tem efeitos menores nas respostas de poropressão quando comparada aos efeitos da tensão confinante. Nos resultados deste trabalho, o efeito do aumento da tensão confinante se mostrou muito mais expressivo no aumento do Δu (Figuras 18b a 23b) do que a cimentação, conforme previamente discutido.

Para avaliar a variação de rigidez nas diferentes condições investigadas neste trabalho, foi calculado o módulo de deformabilidade secante ao ponto onde ocorre 50% da tensão desviadora de ruptura (E_{50}) e avaliada uma possível correlação com a VSU, considerando os resultados obtidos para todas as condições de cimentação avaliadas. A função que apresentou melhor ajuste desses dados foi o modelo linear, considerando-se os valores de VSU elevados ao quadrado, conforme pode ser observado na Figura 25.

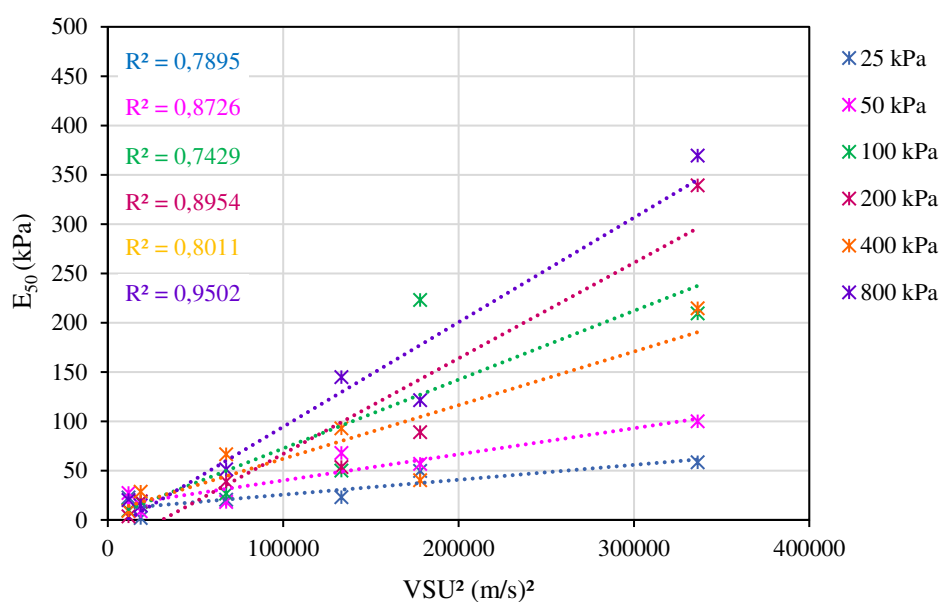


Figura 25: Módulo de deformabilidade secante (E_{50}) versus o quadrado da VSU
 Fonte: (Autoria própria, 2024)

A análise do gráfico permite avaliar a possibilidade de associação entre o E_{50} e o quadrado de VSU, tendo sido observada uma tendência de maiores valores do módulo secante estarem associados a maiores valores de VSU e boas correlações ($0,7429 \leq R^2 \leq 0,9502$) terem sido obtidas para as diferentes condições avaliadas.

Sabendo que E_{50} é obtido a partir da divisão de 50% do valor da tensão desviadora máxima obtida no ensaio pela deformação axial associada, sabe-se que este parâmetro e a variação em seus valores estão associados à variação do grau de cimentação e da tensão de adensamento aplicada no ensaio.

No que se refere à influência da tensão de adensamento, Menegotto (2004) aponta que o E_{50} aumenta com o aumento da tensão de adensamento aplicada no ensaio. Neste trabalho, a mesma observação pode ser apontada. Observando-se a posição dos pontos referentes aos valores de E_{50} na Figura 25, considerando os resultados obtidos para os diferentes níveis de tensão de adensamento, é possível observar uma clara tendência de que maiores valores de E_{50} estão associados a maiores valores de tensão de adensamento.

Em relação ao efeito da cimentação, este pode ser avaliado por duas perspectivas, uma ligada à tensão, considerando o aumento da resistência, e outra à deformação, considerando o aumento da rigidez.

Conforme discutido anteriormente, a adição de cimento gerou ligações cimentícias entre as partículas, redução de tamanho dos poros e preenchimentos dos poros, alterando a microestrutura (Figura 5), sendo tais alterações mais expressivas quanto maior a quantidade de

cimento adicionada, de forma a gerar uma condição de maior densificação capaz de suportar maiores níveis de tensão antes da ruptura. Esse aumento de resistência foi observado pelo aumento nos valores de $\sigma_{dm\acute{a}x}$ proporcional ao aumento do grau de cimentação (Figuras 18a a 23a).

Considerando a parcela do numerador, na qual tem-se 50% do valor de $\sigma_{dm\acute{a}x}$, esse aumento na resistência de pico ($\sigma_{dm\acute{a}x}$) devido à cimentação artificial contribui para o incremento nos valores de E_{50} .

Em relação à deformação, conforme previamente discutido, a cimentação, ao produzir aumento da rigidez (Figuras 17 e 25), promove uma redução na suscetibilidade à deformação comparativamente àquela apresentada pelo solo na condição natural. Autores como Filho e Consoli (2023) também atestam que o solo cimentado é menos compressível que o solo natural. Assim, tendo-se a tendência de menor deformação por parte das misturas de solo com cimento, sendo a deformação axial uma parcela do denominador no cálculo do E_{50} , pode-se inferir que o aumento de rigidez contribui para o aumento do módulo de deformabilidade secante.

Comportamentos similares foram observados por outros autores, como Clough *et al.* (1981), que afirmam que, entre as contribuições do cimento em componentes de resistência, tem-se que a resistência de pico aumenta com o grau de cimentação e a deformação na mobilização da resistência de pico diminui com o grau de cimentação.

No que se refere à VSU, análises do efeito da tensão e da deformação no valor do parâmetro VSU não são aplicáveis para avaliação de fatores ligados aos ganhos de rigidez, de forma que, considerando que a técnica ultrassônica é não destrutiva, não gera deformações nos corpos de prova. Além disso, todo desenvolvimento do ensaio consiste na propagação de ondas em corpos de prova que não sofrem solicitação mecânica, ou seja, que não estão sob ação de tensões solicitantes. Assim, efeitos ligados com deformação e tensão não são mensuráveis neste ensaio e não interferem na determinação do valor da VSU. Entretanto, conforme previamente apresentado, a velocidade cisalhante é um parâmetro que mede indiretamente a rigidez (Ng; Yung, 2008; Cha *et al.*, 2014; Hussien; Karray, 2015) e que, no caso deste trabalho, se mostrou adequada para avaliação e medida das diferenças de rigidez promovidas pela variação no grau de cimentação artificial (Figura 11).

Dessa forma, as boas correlações obtidas entre E_{50} e VSU, apresentadas através da Figura 25, são interessantes sob a perspectiva de se avaliar o efeito da cimentação na rigidez do solo argiloso estudado, considerando-se a análise de um parâmetro associado à rigidez inicial do solo nas condições natural e com cimento (VSU) e um parâmetro associado à influência da

rigidez devida à cimentação nas respostas mecânicas quanto à tensão e deformação (E_{50}). Essa associação, corroborada pelas claras tendências observadas e as boas correlações obtidas, permitem que a VSU seja um parâmetro preliminar que auxilie na compreensão da influência da cimentação artificial no comportamento mecânico tensão-deformação de solos argilosos.

Um aspecto válido de ser ressaltado é o fato de o parâmetro E_{50} ter apresentado maiores variações do que o parâmetro VSU, conforme pode ser observado na Figura 25 através da tendência de maior dispersão apresentada pelos resultados de E_{50} em relação ao modelo matemático adotado para o ajuste. Tal comportamento é coerente se considerado o fato de o ensaio ultrassônico ser um ensaio de execução mais simples que o ensaio triaxial, envolvendo aferição de uma menor quantidade de variáveis e apresentando um maior nível de controle das condições do ensaio. No caso do ensaio triaxial, diferentemente do ensaio ultrassônico, o corpo de prova está submetido a ação de diferentes esforços, sendo, portanto, um ensaio de execução mais complexa, podendo ocorrer imprecisões e variações inerentes às respostas às solicitações impostas ao corpo de prova.

3.4.2. Análise da influência da cimentação nos parâmetros de resistência ao cisalhamento

Os resultados referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto de coesão e ângulo de atrito) das condições de solo natural e com diferentes percentuais de cimento são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo natural e com cimento

Condição avaliada	Critério de Desviadora Máxima						Critério de Obliquidade Máxima					
	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c' (kPa)	Φ' (°)	R ²	c (kPa)	Φ (°)	R ²	c' (kPa)	Φ' (°)	R ²
SN	1,99	12,46	0,9818	4,64	23,52	0,9692	0,67	12,46	0,9841	6,91	23,44	0,9656
SC 1%	0	11,37	0,9988	0	21,60	0,9924	0	11,35	0,9984	4,4	21,29	0,9918
SC 2%	5,74	10,08	0,9950	2,86	19,18	0,9877	2,75	9,92	0,9933	7,59	20,97	0,9954
SC 3%	25,53	8,27	0,9612	28,81	14,54	0,9393	22,92	7,60	0,9599	27,22	18,18	0,9433
SC 5%	72,94	7,15	0,8534	64,15	15,49	0,8602	69,89	5,36	0,7635	47,07	21,27	0,8891
SC 7%	87,44	15,61	0,9970	50,30	32,52	0,9873	81,91	14,02	0,9946	44,29	36,46	0,9970

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Considerando a aplicação dos critérios de desviadora máxima ($\sigma'_{dm\acute{a}x}$) e obliquidade máxima (σ'_1/σ'_3), é possível observar, através da Tabela 7, que os resultados obtidos para os

parâmetros foram próximos e, para ambos os critérios, foram obtidos valores satisfatórios de R^2 .

No que se refere aos resultados obtidos a partir do critério de desviadora máxima, independente da trajetória de tensões avaliada, todos apresentaram correlações com $R^2 > 0,8534$. Considerando essa análise, atrelada ao fato de que, nas curvas tensão-deformação, foram observados picos evidentes de tensão desviadora, possibilitando uma melhor definição da condição de ruptura, optou-se por considerar o critério da desviadora máxima para as análises deste trabalho.

Nas Figuras 26 e 27, são apresentadas as envoltórias resultantes da aplicação deste critério, obtidas a partir da análise de seis tensões confinantes distintas para cada condição avaliada.

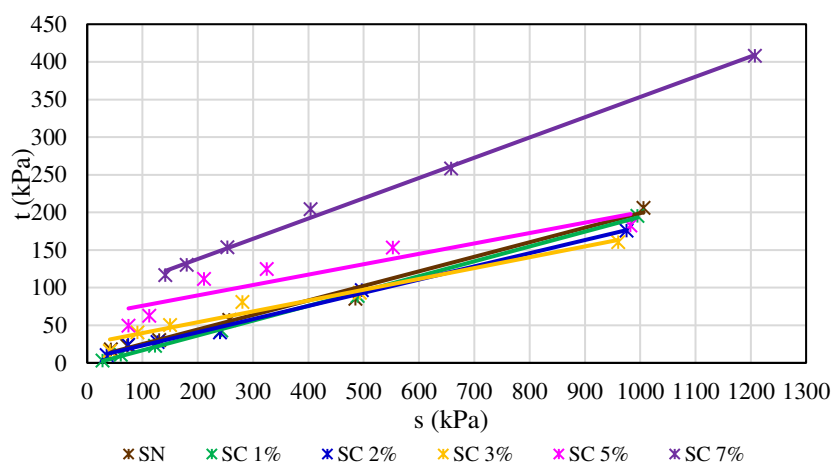


Figura 26: Envoltórias Mohr-Coulomb de tensões totais: critério $\sigma_{dm\acute{a}x}$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

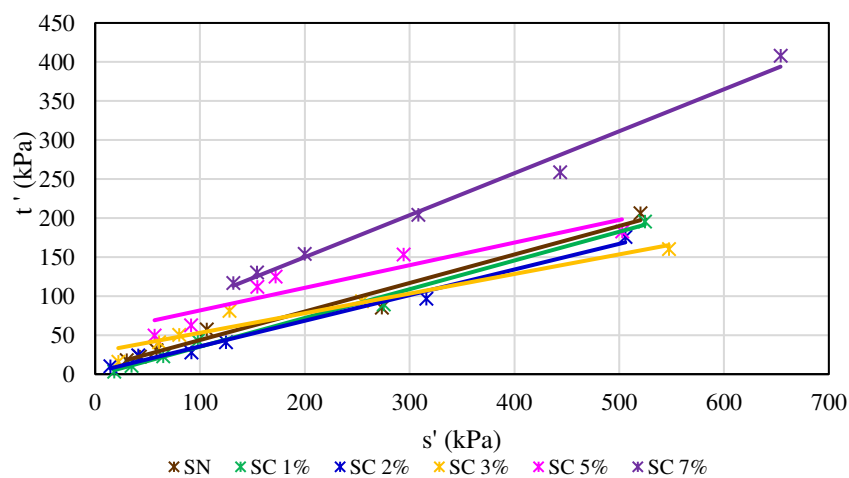


Figura 27: Envoltórias Mohr-Coulomb de tensões efetivas: critério $\sigma_{dm\acute{a}x}$
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando-se as Figuras 26 e 27 e a Tabela 7, é possível perceber que, para as condições avaliadas e os níveis de tensão de adensamento utilizados, as adições de cimento ao solo promoveram alterações tanto no intercepto de coesão quanto no ângulo de atrito do solo. Tal resultado contraria algumas pesquisas que constataram a influência da cimentação apenas na coesão e não no ângulo de atrito (Clough *et al.*, 1981; Akinmusuru, 1987; Zen; Yamazaki; Sato, 1990; Custódio, 2009), mas converge com aquelas que constataram a variação tanto na coesão quanto no ângulo de atrito devida à presença da cimentação artificial (Ue *et al.*, 1997; Oliveira, 2015; Silva, 2016).

No que se refere à interferência da cimentação artificial na coesão, na maioria dos casos, espera-se um aumento do intercepto coesivo mediante adição de cimento, constatação que está presente em diversas pesquisas (Cruz, 2008; Cruz *et al.*, 2011; Oliveira, 2015; Silva, 2016). Na análise dos resultados obtidos, percebe-se, através da Tabela 7, este efeito para todos os teores testados, exceto para 1% de cimento.

Segundo autores como Cruz (2008) e Akinmusuru (1987), a coesão reflete as mudanças da relação tensão-deformação com as alterações no grau de cimentação. Conforme previamente discutido e apresentado através das Figuras 18a a 23a, a adição dos diferentes percentuais de cimento ao solo argiloso alterou seu comportamento tensão-deformação, o que permite inferir que a parcela de coesão acrescida devida à cimentação influenciou diretamente nessa alteração.

Silva e Carvalho (2007) e Mullins *et al.* (1990) afirmam que a coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes. Saxena e Lastrico (1978) afirmam que a coesão abrange qualquer cimentação, seja natural ou artificial ou inter-partículas. Segundo Cruz (2008), a cimentação concede resistência à tração e coesão real ao material. Nessa linha, é possível inferir que as ligações cimentícias originárias das reações de hidratação do cimento e que alteraram a microestrutura do solo natural (Figura 5) contribuíram para o incremento da coesão do solo argiloso, aumentando a resistência do solo. Este acréscimo de resistência explica o aumento dos valores do intercepto coesivo na envoltória de resistência do solo.

No que se refere aos resultados obtidos através de ensaios com corpos de prova com 1% de cimento, nos quais foi observada uma queda do valor do intercepto coesivo, uma possível explicação para esse resultado talvez esteja nos argumentos apresentados por Severo (2011) para situações em que a adição de pequenas percentagens de cimento não promove aumento na coesão. De acordo com o autor, evidências experimentais sugerem que ocorre destruição da cimentação entre as partículas de solo em regimes de pequenas deformações e não são observados aumentos de coesão.

Em relação ao ângulo de atrito, na literatura, não existe um consenso sobre o comportamento desse parâmetro em função da variação do teor de cimento (Silva, 2016). De acordo com Severo (2011), alguns pesquisadores relatam que o agente cimentante tem efeito negligenciável sobre o ângulo de atrito de pico e outros relatam que o agente cimentante conduz a um aumento no ângulo de atrito de pico. No que concerne aos dados obtidos nesta pesquisa, observou-se uma redução dos ângulos de atrito de pico, totais e efetivos, para todos os teores de cimento adicionados (Tabela 7), com exceção ao teor de 7% de cimento que apresentou aumento no valor do ângulo de atrito. Este resultado é distinto do observado em algumas pesquisas (Clough *et al.*, 1981; Schnaid; Prietto; Consoli, 2001; Custódio, 2009; Lopes, 2012).

Considerando que o ganho de resistência ao cisalhamento devido à cimentação artificial foi observado no intercepto coesivo, exceto para o teor de 7% que apresentou aumento em ambos parâmetros (intercepto coesivo e ângulo de atrito), é possível estimar que essa alteração esteja ligada à quantidade de cimento, sendo o teor de 7% o maior investigado neste trabalho. Saxena e Lastrico (1978) afirmam que uma grande variação no ângulo de atrito indica uma variação significativa na cimentação.

A explicação para esse resultado obtido neste trabalho pode ser associada às alterações observadas na granulometria (Figura 7) e na microestrutura (Figura 5), as quais se mostraram mais expressivas para os ensaios das misturas com 7% de cimento.

Pinto (2020) explica que quanto maior o entrosamento entre as partículas maior é o ângulo de atrito. Assim, observando-se que a adição de 7% de cimento promoveu um deslocamento da curva granulométrica para o lado mais grosseiro, sendo possível observar a presença expressiva de agregações de partículas (Figura 5f) que refletem a alteração da granulometria, além do entrosamento entre tais agregações e as partículas menores, é possível explicar-se o ganho na parcela de resistência referente ao ângulo de atrito.

A influência exercida pelos níveis de tensões de adensamento na envoltória de resistência de solos artificialmente cimentados é um fato apontado por diversos autores (Lade; Overton, 1989; Leroueil; Vaughan, 1990; Cuccovillo; Coop, 1999; Marri, 2010; Floss, 2012; Bastos, 2017). Nessa linha, visando compreender melhor o efeito da cimentação nos parâmetros de resistência “intercepto coesivo” e “ângulo de atrito”, foram avaliadas duas novas envoltórias de resistência, uma considerando o regime de baixos níveis de tensão e a outra o de altos níveis de tensão testados neste trabalho.

Assim, foram definidos os parâmetros de resistência para as condições de solo natural e solo com adição de todos os teores testados, considerando o critério de desviadora máxima. Foi definida uma envoltória através do ajuste dos resultados dos ensaios com tensões de

adensamento de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa (baixas tensões) e uma segunda com as tensões de adensamento de 100 kPa, 200 kPa e 800 kPa (altas tensões). Esses resultados são apresentados na Tabela 8. Conforme esperado, a variação dos níveis de tensão de adensamento influenciou na definição da envoltória, alterando o intercepto coesivo e o ângulo de atrito.

Tabela 8: Parâmetros de resistência de pico para diferentes condições de tensões de adensamento

Condição avaliada	Condição 1				Condição 2			
	$(\sigma_a: 25, 50 \text{ e } 100 \text{ kPa})$				$(\sigma_a: 200, 400 \text{ e } 800 \text{ kPa})$			
	c (kPa)	$\Phi(^{\circ})$	c' (kPa)	$\Phi'(^{\circ})$	c (kPa)	$\Phi(^{\circ})$	c' (kPa)	$\Phi'(^{\circ})$
SN	12,18	8,15	4,94	26,15	0	11,80	5,82	21,69
SC 1%	0	24,66	0	11,81	0,93	21,22	0	11,75
SC 2%	10,82	11,89	6,43	10,46	0	20,76	0,85	10,45
SC 3%	4,16	36,50	7,04	17,95	51,87	11,30	41,91	6,95
SC 5%	11,77	40,59	14,93	27,49	99,80	9,84	101,0	4,89
SC 7%	54,45	32,85	74,22	19,33	11,54	36,85	99,49	14,85

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Nesse cenário, foram criadas três condições distintas para avaliação dos parâmetros de resistência: a baixas tensões (Condição 1) e a altas tensões (Condição 2), apresentadas na Tabela 8, e considerando todas as tensões de adensamento avaliadas (Condição 3), exposta através da Tabela 7. O objetivo foi avaliar possíveis correlações diretas entre esses parâmetros e o percentual de cimento adicionado na mistura. Na Figura 28, são apresentados os resultados obtidos para a análise envolvendo o ângulo de atrito de pico (total e efetivo), e na Figura 29, o intercepto coesivo (total e efetivo).

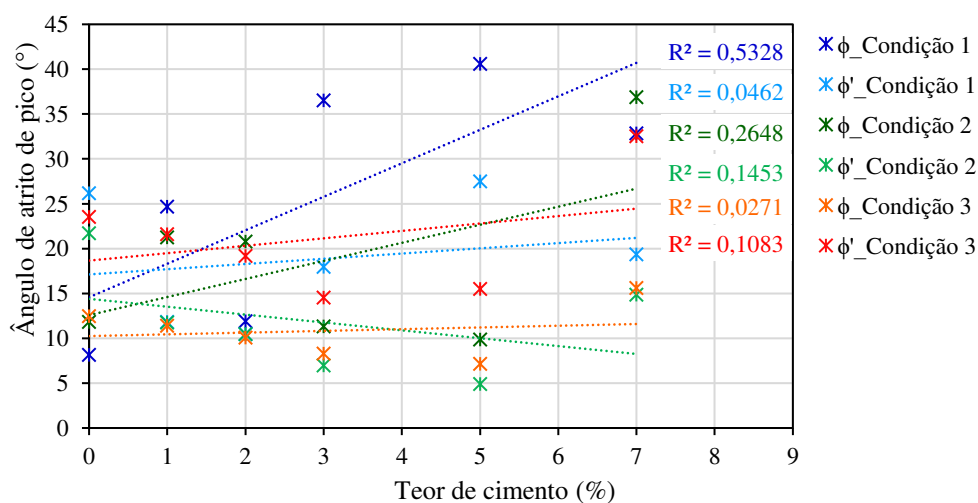


Figura 28: Ângulo de atrito de pico *versus* teor de cimento

Fonte: (Autoria própria, 2024)

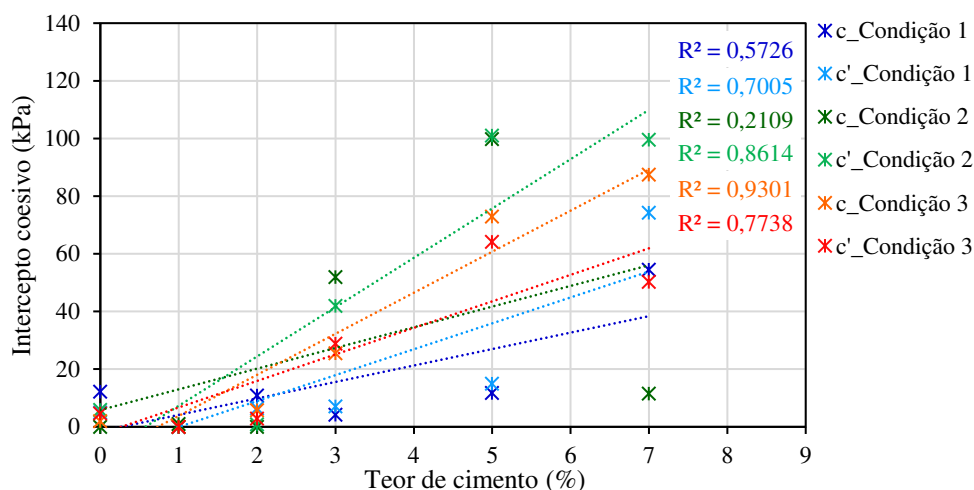


Figura 29: Intercepto coesivo *versus* teor de cimento
 Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da análise da Figura 28, observa-se que, independentemente dos níveis de tensões empregados para a definição da envoltória, não foi possível obter uma relação direta entre ângulo de atrito de pico e percentual de cimento adicionado, não sendo obtida uma correlação adequada. Dessa forma, é possível constatar que, para os resultados obtidos deste trabalho, apesar de observados efeitos da cimentação no ângulo de atrito de pico, não foi possível obter uma tendência comportamental direta entre o ângulo de atrito e o grau de cimentação.

Ao avaliar a Figura 29, percebe-se que, no caso do intercepto coesivo, é possível observar uma relação direta do parâmetro e o percentual de cimentação artificial da mistura. Os resultados mostram, mesmo com uma dispersão dos dados para algumas das condições avaliadas, uma tendência de incremento no valor do intercepto coesivo devido ao aumento no grau de cimentação das misturas do solo argiloso com cimento. Essa tendência pode ser observada nas diferentes condições de tensão de adensamento utilizadas para a definição da envoltória.

Assim, é possível avaliar de forma direta os ganhos de resistência do solo argiloso devidos à cimentação através do mecanismo de coesão. Segundo Gerscovich (2010), no caso de solos coesivos (argilo minerais) ou cimentados, a presença de uma ligação entre partículas faz com que o esforço necessário para a movimentação relativa entre as partículas aumente a parcela resistente independente da tensão normal. Dessa forma, as reações entre solo e cimento, ao produzirem ligações cimentícias entre as partículas do solo, intensificando as ligações e reduzindo o volume de macroporos (Figura 6), resultam em um aumento da parcela de coesão.

O efeito da cimentação nas ligações também já foi previamente identificado pela alteração na plasticidade do solo (Figura 8).

Em um estudo sobre o efeito do teor de cimento no comportamento mecânico de solos cimentados, Consoli *et al.* (2007) concluíram que a porosidade afeta a resistência através da alteração do número de pontos de contato entre as partículas do solo. No contexto desta pesquisa, depreende-se que a adição de cimento, ao promover uma tendência de aumento nos pontos de contato entre as partículas através do surgimento das ligações cimentícias e da já discutida tendência de redução do tamanho dos macroporos, promoveu o aumento observado na parcela de coesão do solo, sendo esse aumento de coesão proporcional ao aumento da quantidade de cimento (Tabela 7 e Figuras 29) devido à intensificação das alterações a nível microestrutural (Figura 6).

Buscando-se aprofundar a compreensão dos efeitos do ganho de coesão devidos ao aumento do grau de cimentação observados, com base nos resultados deste trabalho, foram avaliadas possíveis correlações entre os valores de coesão e a VSU, na tentativa de relacionar resistência e rigidez devida à cimentação.

Na Figura 30, são apresentadas as correlações obtidas entre os valores de intercepto coesivo (total e efetivo) obtidos para os três cenários de intervalo de tensões de adensamento supracitados (Condições 1, 2 e 3) e os valores de VSU. Todos esses resultados são referentes à realização de ensaios CIU nas condições natural e com diferentes graus de cimentação.

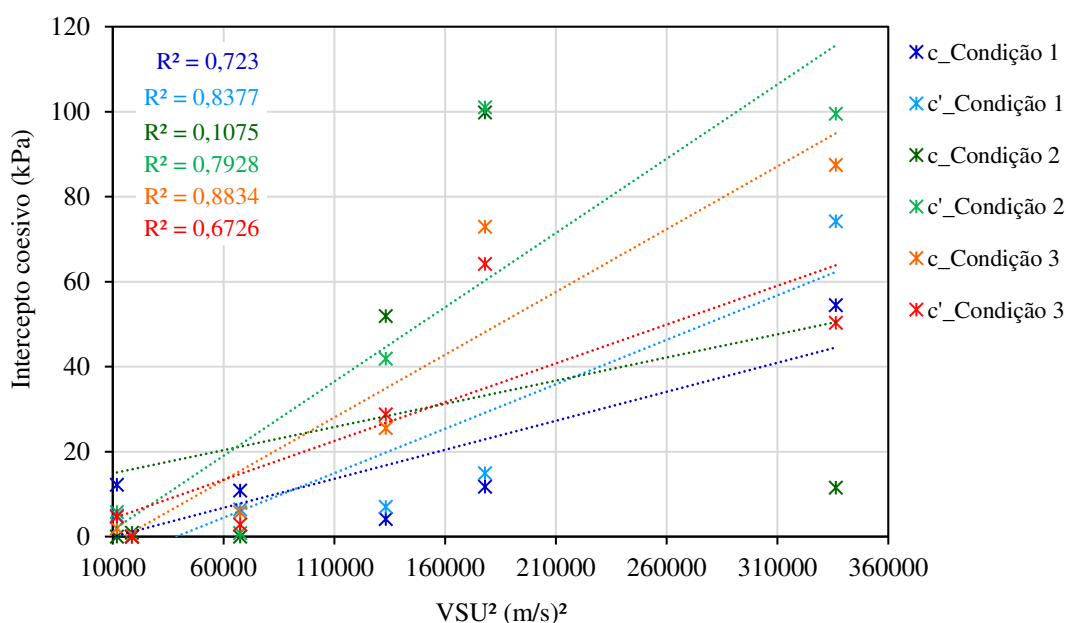


Figura 30: Intercepto coesivo *versus* o quadro da VSU
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Analisando-se a Figura 30, é possível perceber uma tendência de associação de maiores valores do intercepto coesivo a maiores valores de VSU ao quadrado. Apesar de dispersões dos dados terem sido observadas para algumas condições, no geral, foram obtidas boas correlações mediante aplicação do modelo linear.

Dessa forma, é possível inferir que as ligações cimentícias geradas pela adição da cimentação artificial, ao promover uma tendência de aumento nos pontos de contato entre as partículas, produziram tanto um incremento de coesão quanto uma intensificação de contatos que resultou em um esqueleto sólido mais interconectado, proporcionando um meio de propagação mais rápida para a onda cisalhante.

Assim, é possível associar os ganhos de coesão aos incrementos na VSU devidos ao aumento do grau de cimentação, considerando que os mecanismos que produzem esses ganhos de resistência e rigidez se baseiam em princípios similares.

3.4.3. Análise da influência da cimentação nos parâmetros do estado crítico

Com o objetivo de ampliar a compreensão dos efeitos da cimentação artificial no comportamento mecânico do solo argiloso, foi aplicada a teoria do estado crítico nos resultados obtidos dos ensaios CIU, como uma ferramenta visando análises comparativas dos comportamentos. Para tal, foi considerado que o estado crítico foi atingindo para as deformações axiais de 20%. O objetivo dessa análise foi avaliar o efeito da cimentação a nível de grandes deformações.

Nas Figuras 31 a 36, são apresentadas as trajetórias de tensões total (TTT) e efetiva (TTE) no plano $q \times p, p'$, considerando o cálculo da tensão octaédrica. Em sequência, na Tabela 9, são apresentados os valores do ângulo de atrito e demais parâmetros do estado crítico, obtidos através de análises da Linha de Estado Crítico (LEC) no plano $q \times p, p'$ e no plano $e \times \ln p'$.

Os parâmetros do estado crítico, definidos para fins comparativos com o objetivo de ilustrar os efeitos da cimentação artificial neste trabalho, foram:

- M (gradiente da LEC): a inclinação da projeção da LEC no plano $q \times p'$;
- λ (gradiente da Linha de Consolidação Normal - LCN): inclinação da LCN no plano $e \times \ln p'$ (λ);
- Γ : volume específico no estado crítico para $p' = 1$ kPa.

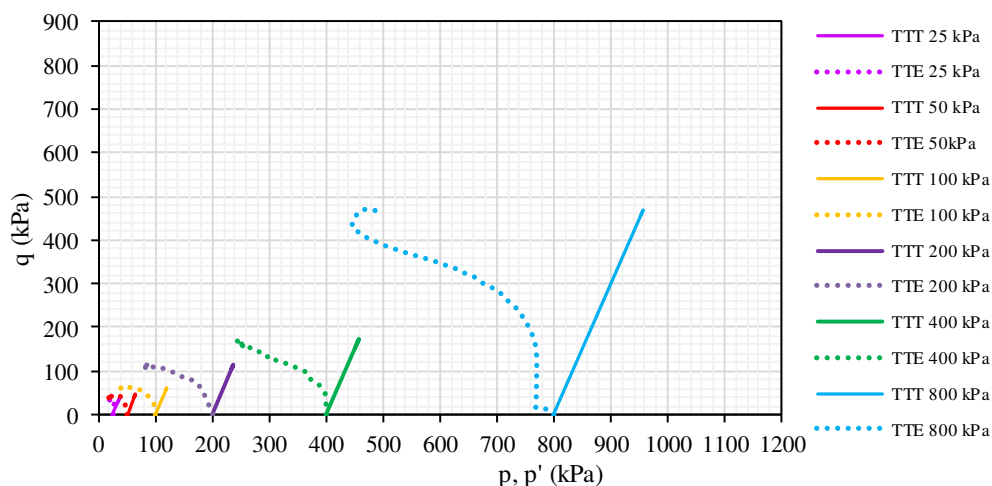


Figura 31: Trajetória de tensões total e efetiva no plano q x p, p' : amostras SN
Fonte: (Autoria própria, 2024)

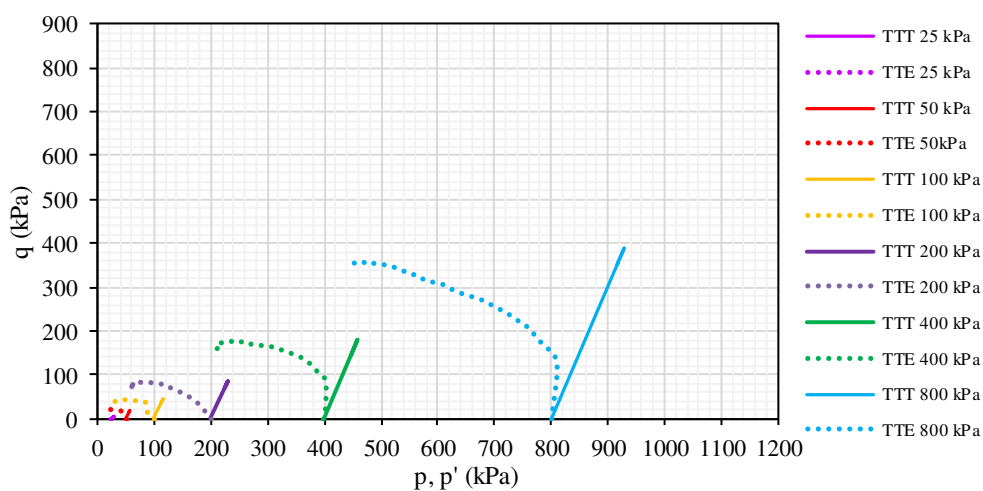


Figura 32: Trajetória de tensões total e efetiva no plano q x p, p' : amostras SC 1%
Fonte: (Autoria própria, 2024)

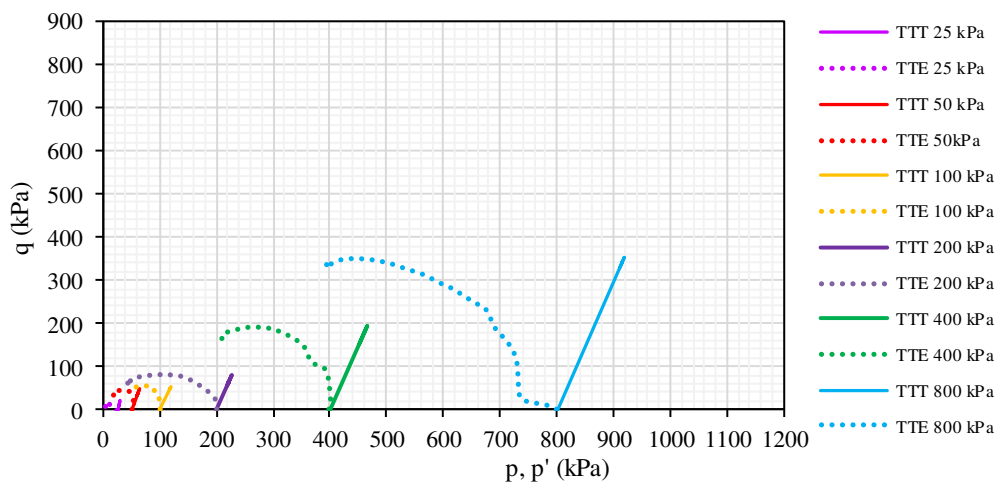


Figura 33: Trajetória de tensões total e efetiva no plano q x p, p' : amostras SC 2%
Fonte: (Autoria própria, 2024)

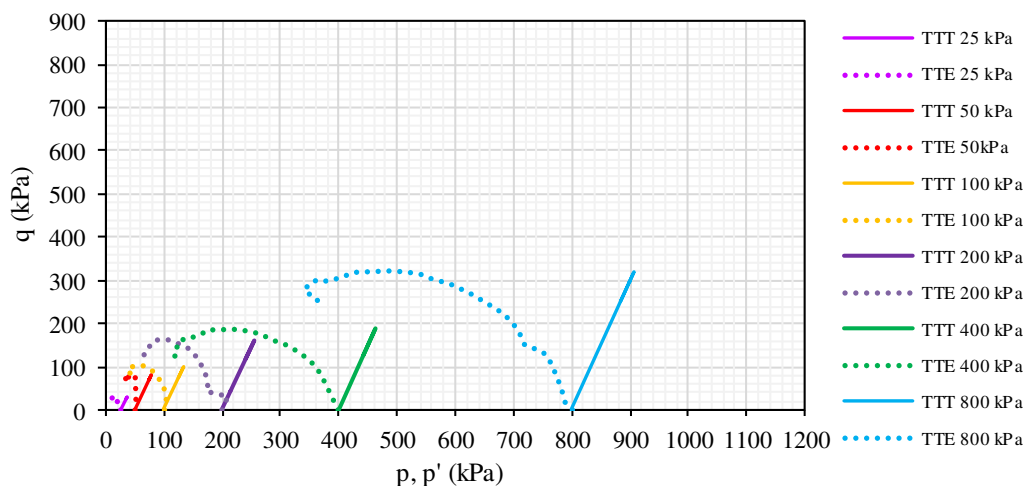


Figura 34: Trajetória de tensões total e efetiva no plano $q \times p, p'$: amostras SC 3%
Fonte: (Autoria própria, 2024)

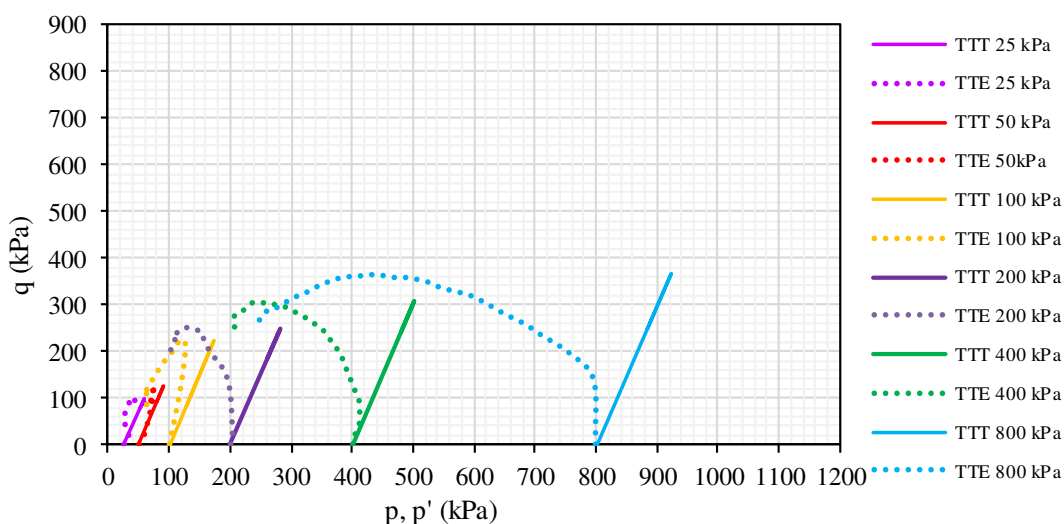


Figura 35: Trajetória de tensões total e efetiva no plano $q \times p, p'$: amostras SC 5%
Fonte: (Autoria própria, 2024)

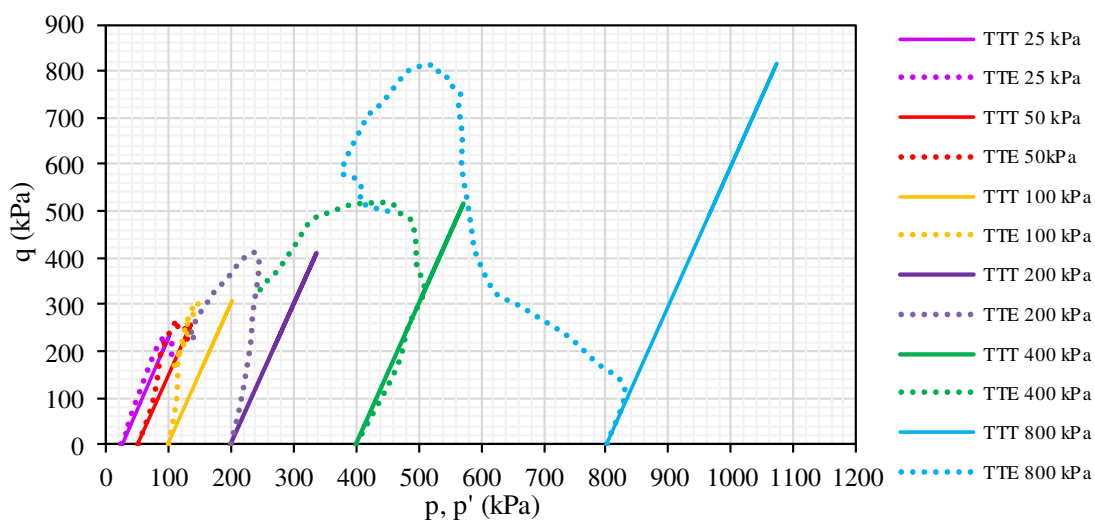


Figura 36: Trajetória de tensões total e efetiva no plano $q \times p, p'$: amostras SC 7%
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Tabela 9: Parâmetros de estado crítico obtidos pelos planos e x lnp' e q x p.p'

Condição avaliada	$\Phi'_{CSL}(\text{°})$	M	R ²	λ	Γ	R ²
SN	22,16	0,863	0,9682	0,171	2,075	0,9338
SC 1%	19,88	0,767	0,9927	0,143	1,958	0,8419
SC 2%	25,14	0,990	0,9919	0,168	2,132	0,9217
SC 3%	20,09	0,776	0,8990	0,117	2,033	0,9298
SC 5%	29,49	1,178	0,9650	0,081	1,915	0,7922
SC 7%	31,19	1,252	0,9817	0,050	1,791	0,8487

Fonte: (Autoria própria, 2024)

Os resultados obtidos através do plano q x p.p' (Figuras 31 a 36 e Tabela 9) indicam uma tendência de aumento no ângulo do estado crítico (Φ'_{CSL}) com o aumento do percentual de cimento adicionado, tendo-se obtido boas correlações para essa análise, conforme pode ser observado pelos valores de R² apresentados. Considerando-se a resistência apenas sob a perspectiva da parcela friccional, é possível associar este aumento no ângulo de atrito do estado crítico com o aumento do teor de cimentação artificial às alterações geradas pelas ligações cimentícias. Filho e Consoli (2023) afirmam que as ligações cimentícias aumentam a resistência de atrito entre as partículas ao promover união/ligação entre as partículas, assim como também contribui para aumento do grau de intertravamento.

Nesta linha, considerando que, para a obtenção dos parâmetros de estado crítico, adota-se que o intercepto coesivo é nulo, o aumento da parcela friccional observado pode ser associado a um maior grau de intertravamento produzido pela presença das ligações cimentícias entre as partículas. Além disso, a união entre as partículas devida à cimentação, que também contribui para o incremento da resistência de atrito, pode ser observada através das imagens de microscopia obtidas pelo MEV (Figura 5), sendo essa mais expressiva quanto maior o percentual de cimento adicionado.

Segundo Cruz, Rodrigues e Fonseca (2011), o incremento no ângulo de atrito no estado crítico pode ser visto como um sinal da influência da cimentação que, ao gerar maiores agregações de partículas (*clusters*), são responsáveis por resultar em diferentes linhas do estado crítico.

Assim, o aumento no ângulo Φ'_{CSL} pode ser associado a uma redução do percentual de argila e a um aumento do percentual de partículas de tamanho areia observados nos ensaios de granulometria (Figura 7), que contribuem para um maior intertravamento devido à presença das aglomerações de partículas, assim como a uma redução na plasticidade (Figura 8), que indica uma alteração nas condições de ligação entre as partículas das misturas de solo com cimento

comparativamente aos resultados de solo natural, sendo tais alterações mais expressivas quanto maior o grau de cimentação.

Através da Tabela 9, é possível notar que a presença da cimentação artificial também alterou os demais parâmetros do estado crítico apresentados (M , λ , Γ). Neves (2016) afirma que estes parâmetros do estado crítico são constantes para um dado solo e traduzem propriedades intrínsecas do material. Assim, considerando que a presença de cimentação artificial alterou as propriedades de caracterização geotécnica do solo, a saber, granulometria (Figura 7), plasticidade (Figura 8), massa específica dos grãos (Figura 6), e que essas alterações foram maiores quanto maior o grau de cimentação, as alterações nos parâmetros do estado crítico são justificáveis.

Para avaliar a possível influência dos incrementos de rigidez produzidos pela cimentação artificial, tendo por base os dados experimentais obtidos neste trabalho, na inclinação da projeção da linha dos estados críticos no plano $q \times p'$ (M) e na inclinação da linha de compressão normal no plano $e \times \ln p'$ (λ), foi avaliada a possível correlação entre esses parâmetros e a VSU. Nas Figuras 37 e 38, são apresentadas as correlações obtidas entre os parâmetros citados, considerando os resultados obtidos para as condições de solo natural e com diferentes graus de cimentação.

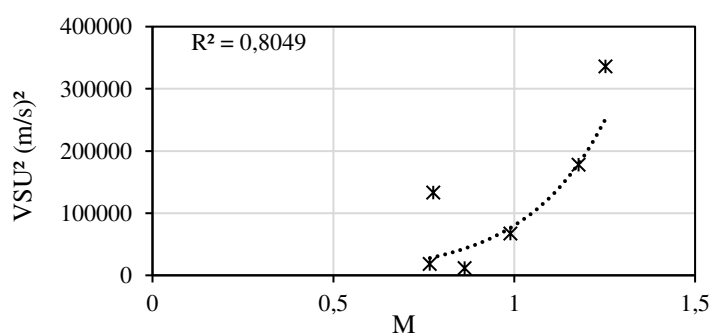


Figura 37: Correlação entre VSU² e o parâmetro de estado M
Fonte: (Autoria própria, 2024)

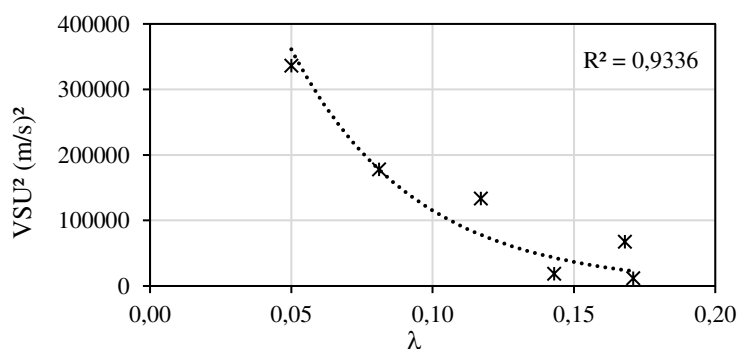


Figura 38: Correlação entre VSU² e o parâmetro de estado λ
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através das Figuras 37 e 38, é possível perceber que boas correlações foram obtidas, o que indica a possibilidade de associação entre os parâmetros. O modelo que apresentou melhor ajuste foi o modelo exponencial, considerando o quadrado da VSU no eixo das ordenadas e os parâmetros do estado crítico nos eixos das abcissas, sendo obtidos R^2 elevados para M ($R^2 = 0,8049$) e λ ($R^2 = 0,9336$).

A Figura 37 permite observar que o parâmetro M apresentou uma relação diretamente proporcional ao quadrado da VSU. Tal observação permite inferir que os ganhos de rigidez promovidos pela cimentação artificial promoveram incrementos tanto na VSU quanto no parâmetro M e que esses incrementos podem ser correlacionados. Considerando o fato que M , por se tratar da inclinação da LEC no plano $q \times p'$, está ligado diretamente ao ângulo de atrito no estado crítico (Φ'_{CSL}), é possível considerar que, indiretamente, incrementos devidos à cimentação no Φ'_{CSL} podem ser associados a incrementos da VSU.

Conforme previamente discutido, as ligações cimentícias, ao promoverem um ganho de rigidez inicial no solo, alterando a microestrutura dos corpos de prova (Figura 5), geraram um esqueleto sólido mais resistente devido à formação da matriz cimentante e à redução dos espaços vazios (poros). Estas alterações proporcionaram condições de propagação mais rápida das ondas cisalhantes (maiores VSU), e essas mesmas condições, geradas pela cimentação, conferiram aos corpos de prova submetidos ao ensaio CIU uma maior resistência, o que permitiu que maiores valores de tensão desviadora fossem atingidos devidos à maior capacidade resistiva e rigidez da condição cimentada. Assim, maiores valores de tensão octaédrica foram observados, sendo esse aumento mais expressivo quanto maior o grau de cimentação (Figuras 31 a 36), o que resultou em retas mais íngremes obtidas através das trajetórias de tensão do plano $q \times p, p'$, e, conseqüentemente, maiores valores de M foram observados.

No caso do parâmetro λ , a inclinação da linha de compressão normal no plano $e \times \ln p'$ (λ), o qual, segundo Neves (2016), corresponde ao gradiente da LEC e costuma ter mesma inclinação do coeficiente de compressão, foi observada uma relação inversamente proporcional com a VSU. Menores valores de λ apresentaram uma clara tendência de estarem associados a maiores valores do quadrado de VSU.

Considerando a perspectiva de aumento de rigidez com o grau de cimentação artificial no solo, maiores valores de VSU são obtidos e uma menor compressibilidade é apresentada pelos corpos de prova de solo com cimento quando submetidos às tensões do ensaio CIU, em vista da rigidez inicial conferida pela cimentação artificial. Assim, menor será o coeficiente de

compressão e menores inclinações serão obtidas no plano $e \times \ln p'$ (λ), tendo-se, portanto, uma redução do valor de λ .

Seguindo a teoria dos estados críticos, foram avaliadas, de forma comparativa, as condições do estado de ruptura no regime de grandes deformações (estado crítico). Para tal, adotou-se uma análise similar à apresentada por Kasama, Ochiai e Yasufuku (2000), considerando-se a plotagem da LEC do solo na condição natural em conjunto com os pontos atingidos no estado crítico obtidos através dos ensaios CIU realizados em corpos de prova de diferentes graus de cimentação.

Na Figura 39, é apresentada a LEC do solo natural plotada no plano $e \times \ln p'$ juntamente com os pontos referentes às condições (índice de vazios e tensão efetiva) nas quais as misturas de solo cimento atingiram o estado crítico. A adoção da linha geral do estado crítico como uma reta constitui uma idealização adequada para apresentar o estado crítico de argilas (Slongo, 2008).

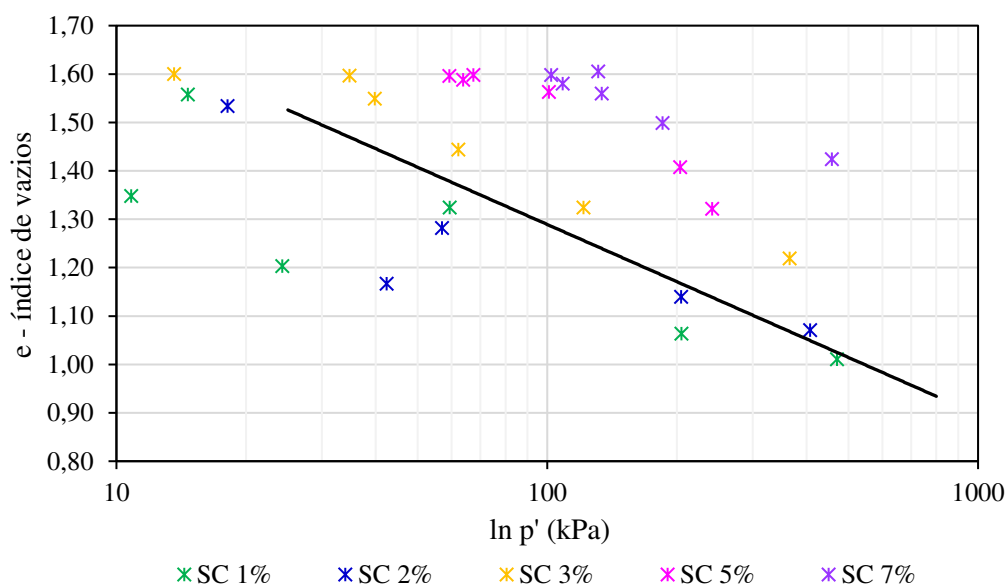


Figura 39: Relação e - $\ln p'$ do solo natural e do solo com cimento no estado crítico
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da Figura 39, observa-se que os pontos obtidos no estado crítico para as misturas com 1% e 2% de cimento ficaram muito próximos, mas abaixo da LEC do solo na condição natural, mas apresentando uma convergência para maiores níveis de tensão. Os pontos da mistura com 3% ficaram muito próximos, mas pouco acima da LEC, e os pontos das misturas com 5% e 7% ficaram distantes e acima da LEC. Esses resultados indicam que o grau de cimentação altera as condições de índice de vazios e tensão efetiva nas quais o solo argiloso atinge o estado crítico.

Segundo Cruz, Rodrigues e Fonseca (2011), a adição de cimento ao solo promove aglutinações de partículas que podem ser parcialmente destruídas ou permanecer intactas, trabalhando como grãos agregados, o que naturalmente influencia no comportamento durante o cisalhamento, mesmo sob ação de elevados níveis de tensão. Os autores ainda afirmam que, conforme o nível de cimentação aumenta, é notória a dificuldade de atingir o estado crítico, sugerindo que é necessário um nível de deformação maior e, para cada grau de cimentação específico, o estado crítico é mais difícil de ser atingido para tensões de confinamento baixas.

Cruz, Rodrigues e Fonseca (2011) completam apontando que quanto mais alto o grau de cimentação na mistura, maiores são as tensões resistidas até que seja atingido o estado crítico. Constatações similares foram obtidas neste trabalho.

Conforme apontado, a posição dos pontos referentes aos teores de 5% e 7% de cimento estão bem acima e à direita da LEC do solo natural, o que indica que atingiram o estado crítico em níveis mais altos de tensão e com valores maiores de índice de vazios que quando realizados os ensaios, considerando as mesmas condições, no solo natural. Tais resultados indicam que a cimentação artificial, ao promover maiores rigidez e resistência, gerou uma condição, devida às ligações cimentícias, de maior resistência à deformação durante a etapa de adensamento, o que permitiu que os corpos de prova chegassem à etapa de cisalhamento com maiores índices de vazios.

Na etapa de cisalhamento, considerando que foi realizado um ensaio não drenado em que a variação do índice de vazios não foi permitida, a maior resistência ao cisalhamento (gerada pelas ligações cimentícias, presença das agregações e alterações microestruturais e granulométricas já discutidas) se manteve não só para as pequenas deformações representadas pela resistência de pico, mas também no regime de grandes deformações. Essa maior resistência resultou na capacidade de suportar maiores níveis de tensão e atingir o estado crítico para níveis de tensão mais elevados que o solo na condição natural.

Para os menores teores de cimento (1%, 2% e 3%), percebe-se que a quantidade de cimento adicionada não foi capaz de alterar significativamente a capacidade resistiva da mistura, comparativamente ao solo natural, no regime de grandes deformações, sendo o estado crítico atingido em condições muito similares ao solo natural.

Na prática, isso implica dizer que, para que seja possível aumentar os níveis de tensão resistidos pelo maciço antes que ele atinja uma ruptura no estado crítico, a adição de cimentação artificial se torna uma solução adequada, desde que o grau de cimentação adicionado seja alto o suficiente para alterar as propriedades geotécnicas e a microestrutura, gerando ganhos de

rigidez e resistência que sejam capazes de manter sua influência até no nível de grandes deformações.

3.4.4. Análise da influência da cimentação na resistência não drenada

O ganho de resistência gerado pela adição de cimentação artificial também pode ser observado através dos resultados da resistência não drenada (S_u) em função da tensão de adensamento (σ'_a), para as condições de solo natural e com adição dos distintos teores de cimento (Figura 40).

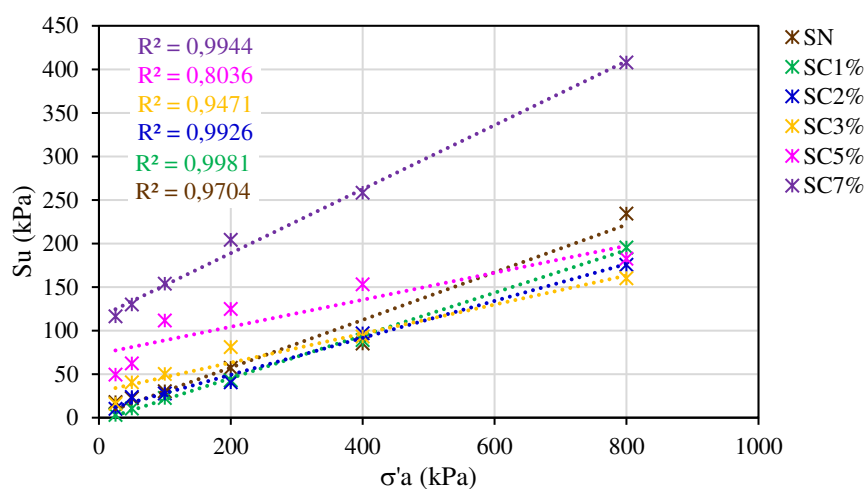


Figura 40: Relação S_u x σ'_a para solo natural e com distintos teores de cimento
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Conforme a Figura 40, boas correlações foram obtidas para todas as condições (solo natural e com diferentes percentuais de cimento) investigadas, tendo o modelo linear se mostrado o mais adequado. Percebe-se que o aumento do teor de cimento resultou em maiores valores de resistência não drenada (S_u). Além disso, é válido ressaltar que, assim como nos demais resultados obtidos dos ensaios triaxiais CIU realizados, os resultados dos menores teores (1%, 2% e 3%) se mostram próximos ao do solo natural, e as alterações mais significativas nos resultados foram observadas para os teores de 5% e 7%.

Segundo Sasanian e Newson (2014), a resistência não drenada de solos argilosos com adição de cimentação artificial é dependente da composição mineral dos elementos envolvidos. Conforme previamente apresentado, devido às suas características químicas e mineralógicas, o solo argiloso adotado nesta pesquisa é classificado como caulínico e possui comportamento laterítico, sendo tais características favoráveis para que o cimento aja como um aditivo, desenvolvendo ganhos de resistência e rigidez (Venson, 2015; Sanbonsuge *et al.*, 2017).

No que se refere à mineralogia do cimento, os resultados do DRX (Figura 2) confirmaram a presença dos elementos que se esperam estar presentes em um cimento Portland CPV-ARI e que são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência.

Assim, é possível explicar que os ganhos observados em Su são consequência das reações ocorridas entre solo e cimento e das alterações que resultaram dessas reações na microestrutura, gerando incremento de resistência e rigidez. Neste trabalho, a ocorrência de reações entre o solo argiloso e o cimento Portland CPV-ARI foi evidenciada pela alteração do meio ácido para básico (Figura 3) e pelo aumento do pH (Figura 4).

Pinto (2020) afirma que, nas argilas, é o arranjo entre partículas e as forças físico-químicas que as unem que influenciam diretamente na resistência não drenada. O autor ainda afirma que, quando existem substâncias cimentantes entre os contatos intergranulares, os deslocamentos de partículas são resistidos inicialmente por essas ligações aglomerantes que agem como uma cola, para depois mobilizar o atrito.

Nessa linha, considerando que o cimento agiu alterando o arranjo entre partículas e a ligação entre elas, é coerente também associar os ganhos de resistência não drenada devidos à cimentação com as alterações na microestrutura.

Com base no conceito apresentado por Pinto (2020), o aumento de resistência não drenada com o aumento da cimentação pode ser também explicado pela intensificação das ligações formadas no contato entre as partículas que, atuando de forma conjunta com o intertravamento dos grãos, causam ganhos de resistência a movimentos cisalhantes ou tangenciais.

Boroumandzadeh e Pakbaz (2012) explicam que um tipo de ligação entre as partículas do solo que promove incremento de resistência são as ligações químicas originárias da cimentação. Segundo os autores, neste tipo de ligação, os grãos são ligados por um material sólido, como o carbonato de cálcio, e para quebrar essas ligações, forças de cisalhamento maiores são requeridas, o que promove um aumento na resistência ao cisalhamento. Assim, esses ganhos são mensurados através do aumento no intercepto coesivo (Tabela 7), que resultaram no aumento de Su com o grau de cimentação.

Previamente, foi discutido o fato de que as ligações cimentícias, ao promoverem uma maior interconexão da fase sólida presente nas misturas de solo com cimento, produziram um meio mais rígido que permitiu uma propagação mais rápida da onda cisalhante (VSU). Considerando essa linha e o fato de que ligações cimentícias também atuam no intertravamento dos grãos e no aumento do contato entre partículas, gerando ganhos de resistência observados por incrementos na resistência de pico ($\sigma_{dm\acute{a}x}$) e, consequentemente, na resistência não drenada

($S_u = \sigma_{dm\acute{a}x}/2$), foram avaliadas possíveis correlações entre esses parâmetros. Para tal, foram considerados os resultados obtidos das condições de solo natural e com todos os graus de cimentação investigados neste trabalho.

As melhores correlações obtidas são apresentadas nas Figuras 41 e 42, considerando, respectivamente, a relação entre a resistência de pico normalizada ($\sigma_{dm\acute{a}x}/\sigma'_a$) e o quadrado da VSU e a relação entre a razão de resistência não drenada (S_u/σ'_a) e o quadrado da VSU.

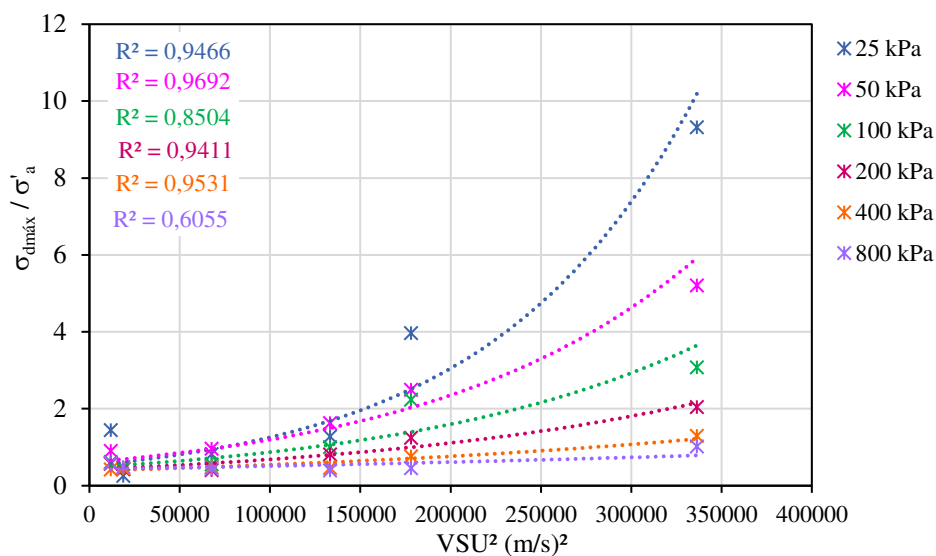


Figura 41: Correlação $\sigma_{dm\acute{a}x}/\sigma'_a$ e o quadrado de VSU
Fonte: (Autoria própria, 2024)

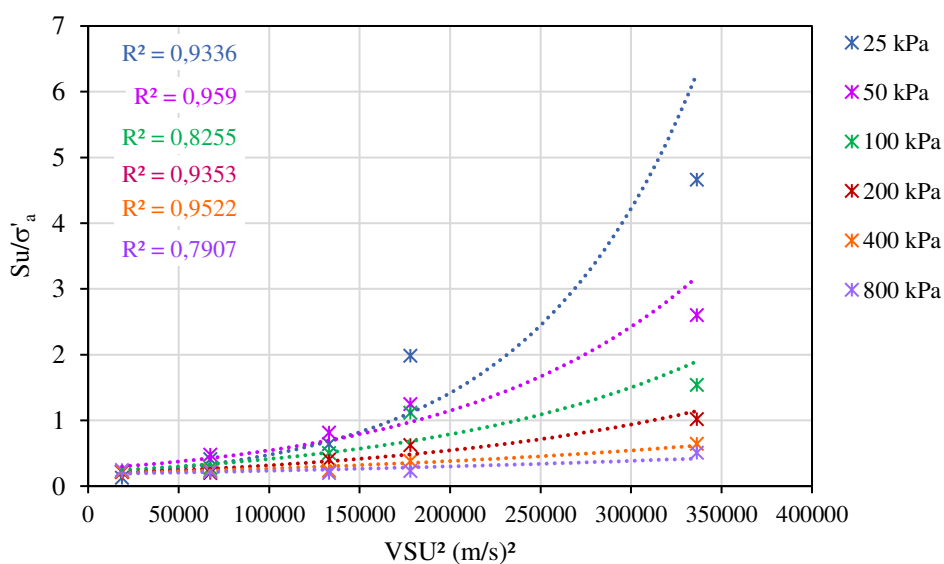


Figura 42: Correlação S_u/σ'_a e o quadrado de VSU
Fonte: (Autoria própria, 2024)

Através da análise das Figuras 41 e 42, é possível observar que, de forma geral, foram obtidos valores elevados de R^2 , o que indica que boas correlações foram obtidas, tendo o modelo exponencial apresentado o melhor ajuste dos resultados. Tais resultados permitem inferir que os valores da resistência de pico normalizada ($\sigma'_{dm\acute{a}x}/\sigma'_a$) e da razão de resistência não drenada (Su/σ'_a), e suas alterações devidas à presença da cimentação artificial, estão ligados com a rigidez inicial apresentada por cada mistura de solo com cimento, e que essa rigidez pode ser avaliada sob a perspectiva da VSU.

4 CONCLUSÕES

Com base no programa experimental adotado para a investigação do efeito da adição do cimento CPV-ARI no comportamento hidromecânico do solo tropical argiloso estudado, considerando-se as particularidades desta pesquisa, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. A mistura do cimento ao solo argiloso promoveu alterações a nível microestrutural que indicaram a alteração de uma estrutura mais aberta para uma estrutura mais fechada e densificada, apresentando uma tendência de redução no volume dos macroporos com o preenchimento de vazios por material cimentício e aglutinação de partículas através das ligações cimentícias, que resultaram em alterações na granulometria indicadas pelo deslocamento da curva para frações mais grossas. As alterações das ligações entre partículas também geraram queda da plasticidade;
2. Boas correlações entre o fator vazios/cimento com VSU ($R^2 = 0,9680$) e VPU ($R^2 = 0,9716$) foram obtidas, o que aponta para a viabilidade de aplicar a técnica ultrassônica para auxiliar na compreensão das alterações de comportamento do solo causadas pela cimentação artificial;
3. O aumento da interconexão do esqueleto sólido e a redução dos poros, promovidos pela cimentação artificial e identificados pelas análises microestruturais, foram comprovados pela técnica ultrassônica através dos incrementos observados em VSU e VPU. Estas alterações se mostraram como os principais fatores responsáveis pela alteração no comportamento hidromecânico do solo argiloso com a variação do grau de cimentação;
4. As alterações microestruturais geradas pela cimentação artificial, com intensificação das ligações entre partículas e redução dos espaços para livre percolação da água, produziram um aumento na capacidade de retenção de água que se mostrou significativo para as condições com maior grau de cimentação. Tais alterações ainda resultaram em maior

dificuldade de deformação da fase sólida para a liberação da água, mesmo com níveis de sucção mais elevados, sendo essa dificuldade consequência da maior rigidez apresentada pelo solo com maior grau de cimentação. Esse aumento da rigidez foi também atestado pelo aumento da VPU, uma vez que as mesmas alterações microestruturais que dificultaram a percolação da água facilitaram a propagação da onda longitudinal ultrassônica;

5. Uma correlação razoável foi obtida entre sucção e VPU, para diferentes graus de cimentação, quando considerado um mesmo teor de umidade de referência. Esta correlação foi considerada relevante, pois ambos os parâmetros são influenciados pela quantidade de água presente na mistura e ambos se mostram adequadamente correlacionados com a rigidez promovida pela cimentação artificial;
6. O aumento no contato entre as partículas, observado nas análises microestruturais, devido ao aumento do grau de cimentação foi responsável por um aumento na parcela de coesão da resistência ao cisalhamento. Esse aumento foi observado através do incremento do intercepto coesivo de pico, para as diferentes envoltórias de resistência avaliadas, não tendo a variação das tensões de adensamento consideradas, para a definição das envoltórias de resistência, se mostrado um fator que alterasse a constatação de incremento devido à cimentação artificial;
7. A associação entre as variações do intercepto coesivo e a VSU, devido ao aumento no grau de cimentação, resultou em boas correlações entre esses parâmetros. Essa constatação permite inferir que a presença das ligações cimentícias promove aumento de resistência e rigidez, representado por aumento da coesão e da VSU, respectivamente;
8. Apesar de constatado que a cimentação artificial altera o ângulo de atrito de pico, não foram observadas tendências comportamentais claras em relação ao efeito do grau de cimentação;
9. No estado crítico, devido ao aumento das tensões máximas atingidas com o aumento do grau de cimentação, resultados estes ligados ao aumento das agregações e do intertravamento entre partículas, foi observado um aumento no parâmetro M e redução no parâmetro λ devidos ao aumento de resistência e rigidez. Estes parâmetros apresentaram boas correlações com o quadrado da VSU, sendo M ($R^2 = 0,8049$) diretamente proporcional e λ ($R^2 = 0,9336$) inversamente proporcional à VSU, para todas as condições de grau de cimentação avaliadas;
10. Uma maior dificuldade de se atingir o estado crítico por parte das misturas com elevado grau de cimentação foi observada, comparativamente ao solo natural. Tal constatação é reflexo do ganho de resistência promovido pela cimentação artificial, o que não foi

observado apenas no regime de pequenas deformações (resistência de pico), mas também no regime de grandes deformações (estado crítico);

11. Boas correlações foram obtidas entre VSU e a deformação volumétrica no adensamento ($\Delta V/V_0$), o módulo de deformabilidade secante (E_{50}), a resistência de pico normalizada ($\sigma'_{dm\acute{a}x}/\sigma'_a$) e a razão de resistência (S_u/σ'_a). Tais constatações indicam a influência da rigidez inicial nas tendências comportamentais de ganho de rigidez e resistência devido ao grau de cimentação, que influenciam diretamente nos valores de tensão resistidos e nas deformações observadas no ensaio CIU. Além disso, reforça a viabilidade de associar essa rigidez e as tendências comportamentais do ensaio, devidas à cimentação artificial, com a VSU, um parâmetro obtido a partir de um ensaio prático, não destrutivo e de fácil aplicação;
12. A resistência não drenada apresentou um aumento devido à presença da cimentação artificial e uma tendência de crescimento praticamente linear com a tensão confinante para as condições de solo natural e misturas de solo com cimento, para todos os teores investigados;
13. O aumento da capacidade de retenção de água devido à elevação da cimentação artificial reforça a relevância prática de aplicação de ensaios não drenados, como o CIU, que viabilizam a obtenção da resistência não drenada, para obras geotécnicas que consideram a estabilização com cimento;
14. Em um viés prático, considerando que os resultados obtidos pela aplicação da técnica ultrassônica apresentaram boas correlações com os parâmetros obtidos de ensaios que avaliam o comportamento hidromecânico (ensaio CIU e curva de retenção de água), é possível considerar o uso dessa técnica em conjunto com os ensaios usuais para análises de estabilidade. Nessa linha, a técnica ultrassônica pode fornecer impressões preliminares do efeito da cimentação artificial, com base nas tendências comportamentais constatadas experimentalmente, na qual é esperado um aumento expressivo da capacidade de retenção de água, quando observado incremento elevado na VPU, e um aumento da capacidade de resistir a cargas e redução da deformabilidade, quando observados incrementos expressivos na VSU, devido ao acréscimo de determinado teor de cimentação artificial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEM, H.H.; VANAPALLI, S.K. **Prediction of the modulus of elasticity of compacted unsaturated expansive soils**. International Journal of Geotechnical Engineering, v. 9, n.2, p.163-175. 2015.

AIREY, D.W.; FAHEY, M. **Cyclic response of calcareous soil from the north-west shelf of Australia.** *Géotechnique*, v.41, n.1, p.101-121. 1991.

AKINMUSURU, J.O. **The effects of cementation on the stress-strain behaviour of a sand.** In: 9th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation, v.1, p. 435-442. 1987.

ALDAOOD, A. **Impact of the fine materials on the saturated and unsaturated behavior of silty sand soil.** *Ain Shams Engineering Journal*, v.11, n.3, p.717-725. 2020.

ALKIKI I.M.; ABDULNAFAA, M.D.; ALDAOOD, A. **Geotechnical and other characteristics of cement-treated low plasticity clay.** *Soils and Rocks*, v. 44, n.1, p.1-10. 2021.

ALMEIDA, R.M.S. **Estabilização de areias monogranulares para fins rodoviários – Estudo aplicado à região de Mira.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.

AMADI, A.A.; OSINUBI, K.J.; OKORO, J.I. **Hydraulic conductivity of unsaturated specimens of lateritic soil-bentonite mixtures.** *Geotechnical & Geological Engineering*, v.41, n.8, p.1-14. 2023.

AMARAL, M.F.; VIANA DA FONSECA, A.; ARROYO, M.; CASCANTE, G.; CARVALHO, J. **Compression and shear wave propagation in cemented-sand.** *Géotechnique Letters*, v.1, p.79–84. 2011.

ASGAHRI, E.; TOLL, D.G.; HAERI, S.M. **Effect of cementation on the shear strength of Tehran gravelly sand using triaxial tests.** *Journal of Science*, v.15, n. 1, p. 65-74. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75mm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D4318-17e1:** Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D4767-11:** Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2011.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D6836-16:** Standard test method for determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge. PA: ASTM International. 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D698-12:** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021a.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D7928-21e1:** Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2021b.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D854-14:** Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. West Conshohocken, PA: ASTM International. 2014.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B.; CHAPUIS, R. P. **A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties.** Canadian Geotechnical Journal, v.40, n.6, p.1104-1122. 2003.

BASSO, R.V.; FERRAZ, R.L.; BELINCANTA, A.; RAMOS, F.S. **Aplicação do método físico-químico de dosagem de misturas solo-cimento aos solos típicos no noroeste do Paraná.** IV Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, ENTECA, Brasil. 2003.

BASTOS, I.J.F.S. **Uma proposta de envoltória de resistência ao cisalhamento para solos arenosos artificialmente cimentados na região metropolitana de Fortaleza.** 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2017.

BEHNOOD, A. **Soil and clay stabilization with calcium and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques.** Transportation Geotechnics, v.17, p. 14–32. 2018.

BELAL, T.; GHEMBAZA, M.S.; BELLIA, Z. **An investigation of the effects of cementation and temperature on water retention curve of compacted silt.** International Journal of Geotechnical Engineering, v. 16, p. 33-43. 2019.

BELLATO, D.; SPAGNOLI, G.; SIMONINI, P. **Mineralogical and mechanical analysis of cement-stabilised sands.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, v.173, n.1, p. 51–60. 2020.

BENATTI, J.C.B.; RODRIGUES, R.A.; MIGUEL, M.G. **Aspects of Mechanical Behavior and Modeling of a Tropical Unsaturated Soil.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 31, p. 1569-1585. 2013.

BIN, S.L.; ZHIBIN, C.Y.; XIAOPING, Z. **Micropore structure of aggregates in treated soils.** Journal of Materials Civil Engineering, v.19, n.1, p.99-104. 2007.

BOROUMANDZADEH, B.; PAKBAZ, M.S. **Evaluation of effect of cementation on drained shear strength of overconsolidated clay soils.** World Applied Sciences Journal, v.16, n.1, p.1375-1379. 2012.

BOSZCZOWSKI, R.B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.** 2008. 617 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2008.

BUI, M.T. **Influence of some particle characteristics on the small strain response of granular materials.** Tese (Doutorado). Universidade de Southampton. 2009.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos – Teoria e Aplicações.** 8ª edição. LTC, Brasil, 2015.

CARDOSO, S.M.; ASSIS, G.M. DE; SARRO, W. DE S.; FERREIRA, G.C. DOS S. **Caracterização de misturas de solo e areia descartada de fundição.** Proc. 6th International Workshop - Advances in Cleaner Production, São Paulo, SP, 2017, available at <http://www.advancesincleanerproduction.net>.

CHA, M.; SANTAMARINA, J.C.; KIM, H.S.; CHO, G.C. **Small-strain stiffness, shear-wave velocity, and soil compressibility.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 140, n. 10. 2014.

CHAMPIRÉ, F.; FABBRI, A.; MOREL, J.C.; WONG, H.; MCGREGOR, F. **Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material.** Construction and Building Materials, v.110, p.70-78. 2016.

CHEN, J.; WANG, H. **The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v.65, n.4, p.445-448. 2006.

CHEN, J.; WANG, H.; YAO, Y. **Experimental study of nonlinear ultrasonic behavior of soil materials during the compaction.** Ultrasonics, v.69, p.19-24. 2016.

CHEN, Y.; UCHIMURA, T.; IRFAN, M.; HUANG, D.; XIE, J. **Detection of water infiltration and deformation of unsaturated soils by elastic wave velocity**. *Landslides*, v.14, n.5, p.1715-1730. 2017.

CHEW, S.H.; KAMRUZZAMAN, A.H.M.; LEE, F.H. **Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.130, n.7, p.696-706. 2004.

CLOUGH, W.G.; KUCK, W.M.; KASALI, G. **Silicate-stabilized sands**. *Journal of Geotechnical Engineering Division, New York*, v. 105, n.1, p. 65-82, 1979.

CLOUGH, W.G.; SITAR, N.; BACHUS, R.C.; RAD, N.S. **Cemented sands under static loading**. *Journal of Geotechnical Engineering Division, New York*, v. 107, n.6, p. 799-817, 1981.

CONSOLI, N. C. CRUZ, R. C. FONSECA. A. V. COOP, M R. **Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE*, v.138, n.1, p.100-109, 2012.

CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for strength control of artificially cemented soils**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE*, v.133, n.2, p.419-436, 2007.

CONSOLI, N.C.; CRUZ, R.C.; FLOSS, M.F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.136, n.5, p.759-763. 2010.

CRISPIM, F.A. **Influência de variáveis de compactação na estrutura dos solos: caracterizações geotécnica, química, mineralógica e microestrutural**. 2010. 125 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CRUZ, N.; RODRIGUES, C.; FONSECA, A.V. **The influence of cementation in the critical state behaviour of artificial bonded soils**. *International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul, Korea*. 2011.

CRUZ, R.C. **Influência da parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 216p, 2008.

CUCCOLVILLO, T.; COOP, M.R. **On the mechanical of structured sands**. *Géotechnique, London*, v. 49, n. 6, p. 741-760, 1999.

CUSTÓDIO, G.S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados**.2009. 187f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG,2009.

DENELEE, D.; DONY, A., COLIN, J.; HERRIER, G.; LESUEUR, D. **The carbonation of a lime-treated soil: experimental approach**. *Materials and Structures*, v. 54, n. 21. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-CLA 259. **Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1996.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; FESTUGATO, L.; CORTE, M.B. **Stiffness of artificially cemented sands: insight on characterization through empirical power relationships.** Road Materials and Pavement Desing, v.22, p.1469-1479. 2019.

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

DONGQING, L.I.; XING, H.; FENG, M.; YU, Z. **The Impact of Unfrozen Water Content on Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soils.** Procedia Engineering, v. 143, p. 1210-1217. 2016.

ELKADY, T.Y.; AL-MAHBASHI, A.M.; AL-REFEAI, T.O. **Stress-dependent soil-water characteristic curves of lime-treated expansive clay.** Journal of Materials in Civil Engineering, v.27, n.3. 2015.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev. e ampl. Brasília: EMBRAPA, 574p. 2017.

EYO, E.U.; NG'AMBI, S.; ABBEY, S.J. **An overview of soil-water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors.** Journal of King Saud University – Engineering Sciences, v. 34, p.31-45. 2022.

FALL, M.; SAMB, S.S. **Effect of high temperature on strength and microstructural properties of cemented paste backfill.** Fire Safety Journal, v.44, n.4, p.642-651. 2009.

FAN, J.; WANG, D.; QIAN, D. **Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v.10, p.791–797. 2018.

FERREIRA, G.C. DOS S.; SARRO, W. DE S.; HOFFMANN, M.; GONÇALVES, R. **Influência das camadas de compactação em inspeções de painéis monolíticos de solo cimento por ultrassom.** Proc. Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção - ConaEnd2014, Abendi, São Paulo, SP, disponível em CD-ROM. 2014.

FERREIRA, J.W.S., CASAGRANDE, M.D.T., TEIXEIRA, R.S. **Sample dimension effect on cement-stabilized sandy soil mechanical behavior.** Soils and Rocks. v.45, n.2, p.1-10. 2022.

FILHO, H.C.S.; CONSOLI, N.C. **Effect of porosity/cement index on behavior of cemented soil: The role of dosage change.** Geotechnical & Geological Engineering. 2023.

FLOSS, M.F. **Parâmetros de controle da resistência e rigidez de solos granulares artificialmente cimentados.** 2012. 191f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre. 2012.

FLOSS, M.F.; CONSOLI, N.C.; HEINECK, K.S. **Metodologia de Dosagem para Solos Areno-Pedregulhosos cimentados**. Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143p, 2005.

FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N.C.; HEINECK, K.S.; VIANA DA FONSECA, A. **Variáveis-chave no controle da resistência mecânica de misturas solo-cimento**. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, SPG, ABMS, ABGE, n. 109, p. 25-42. 2007.

FREDLUND, D.G. **The 1999 RM Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering**. Canadian Geotechnical Journal, v.37, n.5, p.963–986. 2000.

FREDLUND, D.G.; XING, A. **Equations for the soil water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v.31, n.4, p. 521-532. 1994.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D.; BARBOUR, S.L. **The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil–water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v.33, n.3, p.440– 448. 1996.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. **Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil–water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v.31, n.4, p.533–546. 1994.

HAERI, S.M., SEIPHOORI, A., RAHMATI, A. **The behaviour of a limy cemented gravely sand under static loading – case study of Tehran Alluvium**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 13. 2008.

HAERI, S.M.; HAMIDI, A., HOSSEINI S.M.; TOLL, D.G. **Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand**. Geotechnical & Geological Engineering, v.24, p.335–360. 2006.

HE, X.; CHEN, Y.; TAN, X.; WANG, S.; LIU, L. **Determining the water content and void ratio of cement-treated dredged soil from the hydration degree of cement**. Engineering Geology, v. 279. 2020.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, 2010.

HORPIBULSUK, S. **Strength and Microstructure of cement stabilized clay**. IntechOpen Book Series – Chapter 15. Doi: 10.5772/35225. 2012.

HORPIBULSUK, S.; MIURA, N.; BERGADO, D.T. **Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.130, n.10, p.1096-1105. 2005.

HORPIBULSUK, S.; MIURA, N.; NAGARAJ, T.S. **Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams law as a basis.** *Geotechnique*, v. 53, n.4, p.439-444. 2003.

HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; CHINKULKIJNIWAT, A.; RAKSACHON, Y.; SUDDEEPPONG, A. **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations,** *Construction and Building Materials*, v. 24, n.10, p. 2011–2021. 2010.

HOYOS, L.R.; THUDI, H.; PUPPALA, A.J. **Soil-Water Retention Properties of Cement Treated Clay.** In: *Geo-Denver 2007* February 18–21, 2007. Colorado, United States, p. 1–8. 2007.

HUANG, J.T.; AIREY, D.W. **Effects of cement and density on an artificially cemented sand.** *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, p. 553-560. 1993.

HUSSIEN, M.N.; KARRAY, M. **Shear wave velocity as a geotechnical parameter: an overview.** *Canadian Geotechnical Journal*, v.53, n.2, p.252-272. 2016.

ISHIHARA, K. **Soil behaviour in earthquake geotechnics.** Oxford University Press, New York. ISBN 0-19- 856224-1, 1996.

IWASAKI, T.; TATSUOKA, F. **Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sand.** *Soils and Foundations*, v. 38, n.1, p.19–35. 1977.

JIANG, X.; HUANG, Z.; MA, F.; LUO, X. **Large-scale testing of clay soil improved with concrete pieces.** *Materials*, v. 12, n.23. 2019.

JING, P.; SONG, X.; ZHANG, J.; NOWAMOOZ, H. **A review of hydro-mechanical coupling behaviour of cement-treated materials.** *Construction and Building Materials*, v.322. 2022.

JONGPRADIST, P.; YOUWAI, S.; MANORAT, P.; KONGKITKUL, W.; CHUCHEEPSAKUL, S. **Influence of curing stress on one-dimensional yielding of cement-admixed Bangkok clay at high water content.** *Soils and Foundations*, v. 51, n.2, p.351-357, 2011.

KAMRUZZAMAN, A.H.M.; CHEW, S.H.; LEE, F.H. **Structuration and destructuration behavior of cement-treated Singapore marine clay** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.135, n.4, p.573-589. 2009.

KASAMA, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N. **On the stress-strain behaviour of lightly cemented clay based on an extended critical state concept.** *Soils and Foundations*, v. 40, n.5, p.37-47. 2000.

KAUSCHINGER, J.L., PERRY, E.B., HANKOUR, R. **Jet grouting state of the practice.** *Proc. Grouting Soil Improvem. Geosynth. ASCE*, New York 1, p.169–181. 1992.

KHALILI, N.; GEISER, F.; BLIGHT, G.E. **Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence.** *International Journal of Geomechanics*, v.4, n.2. 2004.

KORF, E.P.; PRIETTO, P.D.M.; CONSOLI, N.C. **Hydraulic and diffusive behavior of a compacted cemented soil.** *Soils and Rocks*, v.39, n.3, p.325-331. 2017.

LADE, P.V.; OVERTON, D.D. **Cementation effects in frictional materials.** *Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE, v. 115, n.10, p.1373-1387, 1989.

LADE, P.V.; TRADS, N. **The role of cementation in the behaviour of cemented soils.** *Geotechnical Research*, v.1, p.111–132. 2014.

LADE, R.S.; OVERTON, D.D. **Cementation effects in frictional materials.** *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 115, n. 10, p.1373-1387. 1989.

LEE, F.H.; LEE, Y.; CHEW, S.H.; YONG, K.W. **Strength and modulus of marine clay-cement mixes.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.131, n.2, p.178-186. 2005.

LEE, K.; CHAN, D.; LAM, K. **Constitutive model for cement treated clay in a critical state frame work.** *Soils and Foundations*, v. 44, n.3, p.69-77. 2004.

LENCIS, U.; UDRIS, A.; KORJAKINS, A. **Moisture effect on the ultrasonic pulse velocity in concrete cured under normal conditions and at elevated temperature.** *Construction Science*, p. 71-78. 2013.

LEROUEIL, S.; VAUGHAN, PR. **The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks.** *Geotechnique*, v.40, n.3, p.467-488. 1990.

LEROUEIL, SL.; HIGHT, D.W. **Behaviour and properties of natural and soft rocks.** In: Ta el al. (Eds). *Characterisation and Engineering properties of Natural soils.* Lisse: Swets e Zeitlinger, p.29-254. 2003.

LI, H.; MENG, S.; DONGPING, S.; WEI, Q.; XU, Z.; ZHAO, W. **Influence of moisture on ultrasonic propagation, acoustic emission activity, and failure mechanism in concrete media.** *Construction and Building Materials*, v. 386. 2023.

LOPES, F. M. G. **Estudo do comportamento mecânico de areias artificialmente cimentadas.** 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

LOPES, M. M. S., ALVARENGA, R. D. C. S. S. A., PEDROTI, L. G., RIBEIRO, J. C. L., DE CARVALHO, A. F., CARDOSO, F. D. P. e MENDES, B. C. **Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints.** *Construction and Building Materials*, v. 205, p.463-474. 2019.

LORENZO, G.G.; BERGADO, D.T. **Fundamental parameters of cement-admixed clay – new approach.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.130, n.10, p.1042-1050. 2004.

LU, X.; YE, Z.; WANG, S.; DU, P.; LI, C.; CHENG, X. **Study on the preparation and properties of belite-ye’elinite-alite cement.** *Construction and Building Materials*, v. 182, p. 399–405, 2018.

LUONG, J.; DESTAIN, M.F.; MERCATORIS, B.C.N. **Characterisation of structural properties of soil using ultrasonic waves**. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2014, v. 6, p. 4582-4593, 2014.

LYRA, B.I.; MONTEIRO, E.C.B. **Combate à ação sinérgica da carbonatação e do ataque por cloretos com adição de CBCA**. Brazilian Journal of Development, v.7, n.10, p.98352-98373. 2021.

MANDAL, T.; TINJUM, J.M.; EDIL, T.B. **Non-destructive testing of cementitiously stabilized materials using ultrasonic pulse velocity test**. Transportation Geotechnics. 2016.

MARRI, A. **The mechanical behaviour of cemented granular materials at high pressures**. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham, England, 307.p, 2010.

MAVROULIDOU, M.; ZHANG, X.; GUNN, M.J.; CABARKAPA, Z. **Water retention and compressibility of a lime-treated, high plasticity clay**. Geotechnical & Geological Engineering, v. 31, p.1171–1185. 2013.

McELREATH, R. **Statistical Rethinking: A Bayesian course with examples in R and Stan**. Chapman and Hall/CRC, 2018.

MENEGOTTO, M.L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. 2004. 246f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MENGUE, E.; MROUEH, H.; LANCELOT, L.; MEDJO, E.R. **Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement**. Soil and Foundation, v.57, n.1, p.60-79. 2017.

MEYSAN B. **Shear wave velocity in granular soil considering effects of inherent and stress-induced anisotropy**. Journal of Central South University, v. 28, p.1476-1492. 2021.

MITAL, U.; KAWAMOTO, R.; ANDRADE, J.E. **Effect of fabric on shear wave velocity in granular soils**. Acta Geotechnica. 2019.

MITURSKI, M.; SAS, W.; RADZEVICIUS, A.; SADZEVICIUS, R.; SKOMINAS, R.; STELMASZCZYK, M.; GLUCHOWSKI, A. **Effect of Dispersed Reinforcement on Ultrasonic pulse velocity in stabilized soil**. Materials, v.14, n.6951. 2021.

MULLINS, C.E.; MacCLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M.; YOUNG, I.M. **Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management**. Advances in Soil Science, v.11, p.37-108, 1990.

NADAI, F.M.; MARINHO, F.A.M.; SILVA, J.P.S. **SWRC interpretation of iron ore tailings blends focusing on saturation assessment of dry stacking**. International Journal of Geotechnical Engineering, p.1-14. 2023.

NALON, G.H.; RIBEIRO, J. C. L.; ARAÚJO, E.N.D.; PEDROTI, L. G.; CARVALHO, J.M.F.; SANTOS, R.F.; OLIVEIRA, D.S. **Residual mechanical properties of mortars containing**

carbon nanomaterials exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 275, p.122-123. 2021.

NETO, W.R.V.; CARVALHO, C.J.; CAPUZZO, V.M.S **Investigação Experimental do pH em Interfaces Solo-Concreto.** Geocentro 2019, Brasília/DF, Brasil. 2019.

NEVES, E.M. **Mecânica dos Estados Críticos: Solos Saturados e Não Saturados.** ISTPress-Loja IST: Lisboa, Portugal, 2016.

NG, C.W.W.; YUNG, S.Y. **Determination of the anisotropic shear stiffness of an unsaturated decomposed soil.** *Géotechnique*, v. 58, n. 1, p. 23-35, 2008.

OH, W.T.; VANAPALLI, S.K. **Influence of Poisson's Ratio on the Stress vs. Settlement Behavior of Shallow Foundations in Unsaturated Fine-Grained Soils.** *Soils and Rocks*, v. 39, n.1, p. 71-79. 2016.

OKAZAKI, S.; IWASE, H.; NAKAGAWA, H.; YOSHIDA, H.; HINEI, R. **Effect of moisture distribution on velocity and waveform of ultrasonic-wave propagation in mortar.** *Materials*, v.14, n.4. 2021.

OLIVEIRA, A.D. **Comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados: ensaios, modelagem e aplicação.** 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. **Aspectos da curva de retenção de água de um solo residual compactado.** 5° Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v. 1, p. 279-287. 2004.

OUZIA, A.; SCRIVENER, K. **The needle model: A new model for the main hydration peak of alite.** *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 339–360, 2019.

PEREIRA, S.A.S.; SILVA JUNIOR, A.C.; MENDES, T.A.; GITIRANA JUNIOR, G.F.N.; ALVEZ, R.D. **Prediction of soil-water characteristic curves in bimodal tropical soils using artificial neural networks.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023a.

PEREIRA, G.S.; PITANGA, H.N.; FERRAZ, R.L.; RODRIGUES, R.A.; SILVA, T.O.; NALON, G.H. **Ultrasonic Analysis of Artificial Cimentation effects on Tropical Clay Soils.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023b.

PHAM, T.A.; SUTMAN, M.; MEDERO, G.M. **Validation, reliability, and performance of shear strength models for unsaturated soils.** *Geotechnical & Geological Engineering*, v.41, n.7, p.4271-4309. 2023.

PINTO, C.S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** Oficina de Textos, 2020.

PRIETTO, P.D.M. **Resistência e dilatância de solos cimentados: uma abordagem teórico-experimental.** 2004. 230 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, 2004.

QUANG, N.D., CHAI, J.N. **Permeability of lime-and cement-treated clayey soils.** *Canadian Geotechnical Journal*, v. 52, p.1221–1227. 2015.

RANAIVOMANANA, H.; RAZAKAMANANTSOA, A.; AMIRI, O. **Effects of cement treatment on microstructural, hydraulic, and mechanical properties of compacted soils: characterization and modeling.** International Journal of Geomechanics. v.18, n.9. 2018.

ROSA, F.D.; CONSOLI, N.C; HEINECK, K.S. **Comportamento de um solo artificialmente cimentado curado sob tensão a partir de ensaios triaxiais.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Anais. 2006.

ROTTA, G.V.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; COOP, GRAHAMS, J. **Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress.** Geotechnique, v.53, n.5, p.493-501. 2003.

SANBONSUGE, K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.; MOURA, E. **Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento.** Transportes, v. 25, n.4, p.68-82. 2017.

SARRO, W. DE S. **Constantes Elásticas de Solo Compactado a Partir do Ensaio de Ultrassom.** 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Tecnologia, Universidade de Campinas, São Paulo, 2017.

SARRO, W. DE S.; FERREIRA, G.C. DOS S.; GALLETTO, A. **Técnica de ultrassom aplicada na inspeção de edificações construídas em solo compactado.** Proc. 57º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2015, IBRACON, Bonito, MS, CD-ROM. 2015.

SARRO, W.S.; ASSIS, G.M.; FERREIRA, G.C.S. **Experimental investigation of the UPV wavelength in compacted soil.** Construction and Building Materials, v.272, p.1-8. 2021.

SARRO, W.S; FERREIRA, G.C.S. **Soil elastic modulus determined by Ultrasound tests.** Soil and Rocks, v.42, n.2, p.117-126. 2019.

SASANIAN, S.; NEWSON, T.A. **Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays.** Soils and Foundations, v. 54, n.2, p.209-224, 2014.

SAXENA, S. K.; LASTRICO, R. M. **Static properties of lightly cemented sand.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v. 104, n. 12, p. 1449-1464, 1978.

SCHNAID, F.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N.C. **Characterization of Cemented Sand in Triaxial Compression.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n. 10, p.857-868, out. 2001. American Society of Civil Engineers (ASCE). 2001.

SCHOFIELD, A.N.; WROTH, P. **Critical state soil mechanics.** London: McGraw-hill, 1968.

SEKI, K. **SWRC-fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 4, p. 407-437. 2007.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M.T. **Closed-form hydraulic conductivity for multimodal unsaturated soil hydraulic properties.** Vadose Zone Journal, v.21, n.1. 2022.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M.T. **Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties.** Journal of Hydrology and Hydromechanics. v.71, n.1, p.22-34. 2023.

SELÇUK, L.; SEKER, V. **Predicting California bearing ratio of foundation soil using ultrasonic pulse velocity.** Proceedings of the institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, v. 172, n. 4, p. 320- 330. 2019.

SEVERO, R.N.F. **Caracterização geotécnica da falésia da ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente.** 2011. 228f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA J, AZENHA M, CORREIA AG, FERREIRA C. **Continuous stiffness assessment of cement-stabilised soils from early age.** Geotechnique, v. 63, 2013.

SILVA, A.J.N.; CARVALHO, F.G. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 853-862, 2007.

SILVA, L.A. **Estudo experimental do comportamento de tensão, deformação e resistência de solos artificialmente cimentados.** 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVA, S.R.R. da. **A general framework for the geomechanical characterization of artificially cemented soil.** 201f. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2011.

SILVA, S.R; FONSECA, A.V.; CONSOLI, N.C. **Strenght and stiffness properties of mixtures granitic soil-cement.** 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, Gramado, v.1, p. 312-315, 2009.

SIVAKUMAR, V.; WHEELER, S.J. **Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay.** Géotechnique, v. 50, n.4, p.359-368. 2000.

SLONGO, G.R. **Desenvolvimento de um sistema triaxial servo-controlado e avaliação do comportamento mecânico de um solo residual de biotita gnaïsse.** 2008. 137f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro. 2008.

STOLTZ, G.; CUISINIER, O.; MASROURI, F. **Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil.** Applied Clay Science, v. 61, p.44–51. 2012.

SUAZO, G.; FOURIE, A.; DOHERTY, J. **Experimental study of the evolution of the soil water retention curve for granular material undergoing cement hydration.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.142, n.7. 2016.

SUZUKI, K., NICHIKAWA, T., HAYASHI, J., ITO, S. **Approach by zeta potential on the surface change of hydration of C3S.** Cem. Concr. Res. v. 11, p.759–764. 1981

TABET, W.E.; CERATO, A.B.; ELWOOD MADDEN, A.S.; JENTOFT, R.E. **Characterization of hydration products' formation and strength development in cement-stabilized kaolinite using TG and XRD**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.30, n.10. 2018.

TADDY, M. **Business Data Science: Combining Machine Learning and Economics to Optimize, Automate, and Accelerate Business Decisions**. Nova York: McGraw-Hill, 2019.
TAN, T.S.; GOH, T.L.; YONG, K.Y. **Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing**. *Geotechnical Testing Journal*, v. 25, n.4, p.1-12. 2002.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1997.

TEIXEIRA, I.; SARRO, W. DE S.; CARDOSO, S.M.; MACEDO, G.; FERREIRA, G.C. DOS S. **Influência da granulometria e umidade nas propriedades de solos a partir de ensaios destrutivos e não destrutivos**. *Proc. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, ANPET, Ouro Preto*, p. 196-207. 2015.

TERASHI, M. **A new frontier of the ground improvement geosystems**. *Tsuchi-to-Kiso, JSSMF*, v. 42, n. 2, p.1-6. 1994.

TOOL, D.G.; ONG, B.H. **Critical-state parameters for an unsaturated residual sandy clay**. *Géotechnique*, v.53, n.1, p. 93-103, 2003.

TOPOLNICKI, M. **In situ soil mixing**. In: Kirsch, K., Bell, A. (Eds.), *Ground Improvement*, third ed. CRC Press, London, p. 329–434. 2013.

TREMBLAY, H.; LEROUÉIL, S.; LOCAT, J. **Mechanical improvement vertical yield stress prediction of clayey soils from eastern Canada treated with lime or cement**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 38, p. 567-579. 2001.

TRINDADE, T.P. **Caracterização tecnológica de solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em estradas e em obras geotécnicas de caráter ambiental**. 2006. 254 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

TYAGI, A.; XIAO, H.W.; CHIN, K.; LEE, F. **Model for predicting the unit weight of cement-treated soils**. *Soils and Foundations*, v. 59, p.1921-1932, 2019.

UDDIN, K. **Strength and Deformation Behaviour of Cement treated Bangkok Clay**. (Doctoral thesis). Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 1997.

UE, S.; FUJIWARA, H.; TAKEUCHI, J.; FUKUDA, Y.; SAKAI, T.; YANAGIHARA, K. **Mechanical properties of stabilized kaolin clay by cement type solidifier**. *JSCE*, n.582, p.205-214. 1997.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892–898. 1980.

VANAPALLI, S.K.; ADEM, H.H. **Elasticity moduli of expansive soils from dimensional analysis**. Geotechnical Research, ICE publishing, v.1, n.2, p.60-72. 2014.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUF AHL, D.E. **The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till**. Géotechnique, v.49, n.2, p.143–159. 1999.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUF AHL, D.E.; CLIFTON, A.W. **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction**. Canadian Geotechnical Journal, v.33, n.3, p.379-392. 1996.

VENSON, G. I. **Módulo de resiliência e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 158p, 2015.

WANG, Y.; FALL, M.; WU, A. **Initial temperature-dependence of strength development and self-desiccation in cemented paste backfill that contains sodium silicate**. Cement and Concrete Composites, v.67, p. 101-110. 2016.

WEIDINGER, D.M.; GE, L.; STEPHENSON, R.W. **Ultrasonic pulse velocity tests on compacted soil**. In GeoHunan International Conference 2009. 2009.

XIAO, H.W.; LEE, F.H. **Curing time effect on behavior of cement treated marine clay**. In: Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, v.33, p. 71-78, 2008.

XUAN, D.X.; MOLENAAR, A.A.A.; HOUBEN, L.J.M. **Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases**. Journal of Cleaner Production, v. 100, n.1, p. 77–83. 2015.

YAJIMA, J.; NAGAOKA, T.; TANIZAKI, S. **Mechanical properties and failure criterion of normally and overconsolidated cement-treated soil**. JSCE, n.582, p.217-228. 1997.

YANG, H.; HE, C.; XIAO, J.; WENTAO, Z. **Analysis on Improvement Effect of Expansive Soil by Soil-Water Characteristic Curve**. In: GeoHunan International Conference 2011: Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior. p. 272–279. 2011.

YE, G.; LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; FRAAJI, A. L. A. **Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement**. Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 491 – 497. 2004.

YESILLER, N.; INCI, G.; MILLER, C. J. **Ultrasonic testing for compacted clayey soils**. Proceedings of Geo-Denver 2000: Advances in Unsaturated Geotechnics (Shackelford CD, Houston SL and Chang Ny (eds)). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Geotechnical Special Publication n.99, p. 54-68. 2000.

YILMAZ, E.; BELEM, T.; BUSSIÈRE, B.; MBONIMPA, M.; BENZAAZOUA, M. **Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents**. Construction and Building Materials, v. 75, p. 99-111. 2015.

YIN, J.H.; LAI, C.K. **Strength and stiffness of Hong Kong marine deposits mixed with cement.** *Geotechnical Engineering*, v.29, n.1, p. 29-44.1998.

ZEN, K. **Remedial measures for reclaimed land by premixing.** *Tsuchi-to-Kiso, JSSMF*, v. 42, n. 2, p.37-42. 1994.

ZEN, K.; YAMAZAKI, H.; SATO, Y. **Strength and deformation characteristics of cement treated sands used for premixing method.** *Report of the Port and Harbour Research Institute*, v. 29, n.2, p.85-118. 1990.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; DAI, G. **Estimation of tensile strength of sandy soil from soil–water characteristic curve.** *Acta Geotechnica*, v. 15, p.3371–3381. 2020.

ZHANG, J.X.; WANG, B.; SONG, B. **Composition design and performance characterization of a novel backfilling concrete derived from urban construction waste.** *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p.508–516. 2018.

ZHOU, C.; NG, C.W.W. **A new and simple stress-dependent water retention model for unsaturated soil.** *Computers and Geotechnics*, v.62, p.216–222. 2014.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Nesta pesquisa, foi proposto o desenvolvimento de um estudo experimental para investigar a influência da estrutura e da cimentação artificial no comportamento hidromecânico de um solo residual tropical argiloso, considerando-se análises das respostas obtidas em nível macroestrutural subsidiadas pela microestrutura e mineralogia e pela aplicação da técnica ultrassônica, visando contribuir para o avanço científico na compreensão das causas das peculiaridades comportamentais deste solo e do efeito da variação do grau de cimentação.

O Capítulo 2 apresentou o estudo da influência da estrutura na curva de retenção de água e no comportamento do solo tropical residual argiloso quanto à compressibilidade e sua susceptibilidade ao colapso, analisando-se os fatores que intervêm em sua ocorrência e o efeito de ciclos de umedecimento e secagem. A partir desse estudo, foi possível concluir que a variação da estrutura, ao promover, a nível microestrutural, uma variação na forma de organização e nas condições de ligação entre as partículas e no volume e condições dos poros, alterou a compressibilidade do solo, a nível de deformações elásticas e plásticas, e o comportamento bimodal da curva de retenção de água, a nível de macroporos.

A suscetibilidade do solo ao colapso se mostrou ligada à existência de uma condição de poros interconectados e ao teor de umidade inicial da amostra. Os ciclos de umedecimento e secagem influenciaram de forma distinta a ocorrência do colapso para o solo natural e o solo com cimento. O potencial de colapso foi mais expressivo, para um dado intervalo de tensões de inundação, para as condições que apresentaram uma maior rigidez inicial promovida por uma ação combinada da cimentação artificial e sucção, na condição não saturada. Esses resultados reforçam a importância de um controle de umidade rigoroso em campo visto que sua variação pode causar alterações em diferentes propriedades hidromecânicas comportamentais do solo.

Os resultados desse estudo apontaram para a viabilidade e eficiência da aplicação da velocidade de pulso ultrassônico da onda longitudinal como parâmetro para constatação de variações de condições estruturais dos corpos de prova, o que indica uma possível aplicação prática da técnica que seria a avaliação da qualidade de amostras indeformadas. Entretanto, uma limitação quanto a aplicação da técnica é o grau de saturação da amostra. O aumento da quantidade de água nos vazios reduz a confiabilidade da velocidade de pulso ultrassônico da onda longitudinal devido à interferência expressiva em sua propagação.

No Capítulo 3, foi apresentado o estudo investigativo de misturas do solo tropical argiloso com diferentes teores de cimento, a fim de se compreender as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas associadas às alterações mineralógicas e microestruturais causadas pela cimentação artificial, aplicando-se a técnica ultrassônica e avaliando-se, de forma correlacionada, os resultados dos ensaios propostos.

Os resultados mostraram a capacidade da resposta ultrassônica em revelar efeitos diretos da cimentação artificial na micromorfologia, plasticidade e granulometria. A transformação de uma microestrutura com poros maiores em uma estrutura densa com partículas ligadas por compostos cimentícios proporcionou novos caminhos para a propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e uma maior resistência mecânica à aplicação de cargas cíclicas e estáticas. Foram observadas tendências de incremento praticamente lineares de velocidade de pulso ultrassônico da onda longitudinal (VPU), resistência à compressão simples (RCS) e módulo de resiliência (MR) com a adição de cimento. Correlações lineares satisfatórias foram obtidas entre os valores de VPU e MR ou RCS.

Através do Capítulo 4, apresentou-se o estudo referente à análise das alterações no comportamento hidromecânico do solo tropical argiloso devidas à variação do grau de cimentação artificial, tendo por base análises do efeito da cimentação a nível microestrutural, como subsídio para interpretação dos resultados, e avaliações mediante aplicação da técnica ultrassônica, visando a obtenção de informações complementares sobre a taxa de alteração nas propriedades hidromecânicas do solo atribuídas à cimentação.

As alterações microestruturais geradas pela cimentação artificial, com intensificação das ligações entre partículas e redução dos espaços para livre percolação da água, produziram um aumento na capacidade de retenção de água que se mostrou significativo para condições com maior grau de cimentação. Essas alterações microestruturais, devidas ao aumento do grau de cimentação, também produziram incrementos no intercepto coesivo, na resistência não drenada e nas velocidades de pulso ultrassônico para as ondas cisalhantes (VSU) e longitudinais (VPU). No que se refere ao ângulo de atrito de pico, apesar de observar interferências em seu valor devidas à cimentação, não foi constatada uma nítida tendência comportamental. Além disso, foi observada uma maior dificuldade em se atingir o estado crítico por parte das misturas com elevado grau de cimentação, comparativamente ao solo natural.

Boas correlações (elevados valores de R^2) foram obtidas entre VSU e a deformação volumétrica no adensamento ($\Delta V/V_0$), o módulo de deformabilidade secante (E_{50}), a resistência de pico normalizada ($\sigma'_{dm\acute{a}x}/\sigma'_a$) e a razão de resistência (S_u/σ'_a). Tais constatações indicam a influência da rigidez inicial nas tendências comportamentais de ganhos de rigidez e resistência

devidos ao grau de cimentação. Além disso, reforça a viabilidade de associar essa rigidez e as tendências comportamentais do ensaio, devidas à cimentação artificial, com a VSU, um parâmetro obtido a partir de um ensaio prático, não destrutivo e de fácil aplicação.

Em um viés prático, considerando que os resultados obtidos pela aplicação da técnica ultrassônica apresentaram boas correlações com os parâmetros obtidos de ensaios que avaliam o comportamento hidromecânico (ensaio CIU e curva de retenção de água), é possível considerar o uso dessa técnica em conjunto com os ensaios usuais para análises de estabilidade. A técnica ultrassônica pode fornecer impressões preliminares do efeito da cimentação artificial, com base nas tendências comportamentais constatadas experimentalmente, sendo esperado um aumento expressivo da capacidade de retenção de água, quando observado um incremento elevado na VPU, além de um aumento da capacidade de resistir às cargas e de uma redução da deformabilidade, quando observados incrementos expressivos na VSU, devidos ao acréscimo de cimentação artificial.

De forma geral, os estudos desenvolvidos nesta pesquisa indicaram a possibilidade de se considerar a técnica ultrassônica como uma forma de se identificar a taxa de alteração na microestrutura, a partir do efeito de variação de ligações cimentícias, teor de umidade e arranjo de partículas. Além disso, foram obtidas boas correlações entre parâmetros obtidos de tradicionais ensaios de geotecnia com o ensaio ultrassônico, o que indica a viabilidade do uso dos valores de onda ultrassônica como parâmetros preliminares em estudos que envolvem investigações geotécnicas.