

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

BRUNO PEREIRA DE QUEIROZ

**EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COMBINADA DO LICOR NEGRO KRAFT DE
MADEIRA DE PINUS E CIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
HIDRÁULICAS DE UM SOLO ARGILOSO DE ALTA COMPRESSIBILIDADE**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

BRUNO PEREIRA DE QUEIROZ

**EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COMBINADA DO LICOR NEGRO KRAFT DE
MADEIRA DE PINUS E CIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
HIDRÁULICAS DE UM SOLO ARGILOSO DE ALTA COMPRESSIBILIDADE**

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

Orientadora: Rejane Nascentes

Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz

Maria Eugenia Gimenez Boscov

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

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

T

Q3e
2021

Queiroz, Bruno Pereira de, 1994-

Efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo de alta compressibilidade / Bruno Pereira de Queiroz. – Viçosa, MG, 2021.

136 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Rejane Nascentes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 99-107.

1. Estabilização do solo. 2. Barreiras. 3. Permeabilidade.
- I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

BRUNO PEREIRA DE QUEIROZ

**EFEITO DA ESTABILIZAÇÃO COMBINADA DO LICOR NEGRO KRAFT DE
MADEIRA DE PINUS E CIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E
HIDRÁULICAS DE UM SOLO ARGILOSO DE ALTA COMPRESSIBILIDADE**

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

APROVADA: 10 de março de 2021.

Assentimento:



Bruno Pereira de Queiroz
Autor



Rejane Nascentes
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e a todas as instituições que contribuíram para a realização desta pesquisa:

À prof.^a Dr.^a Rejane Nascentes, pela orientação, amizade, confiança, incentivo e constante apoio.

Ao prof. Dr. Roberto Lopes Ferraz, pela coorientação, amizade, confiança, incentivo e constante apoio.

À prof.^a Livre Docente Maria Eugenia Gimenez Boscov, pela coorientação, confiança e constante apoio.

Ao prof. M.Sc. Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pelas diretrizes com equipamento de percolação em coluna.

Aos técnicos do laboratório Leonício (Dedé) e Marcelo, pela amizade, auxílio na execução dos ensaios que compuseram este trabalho.

À minha família, pelo apoio, incentivo, carinho e dedicação.

A Ramon, pelo apoio, incentivo, carinho e dedicação.

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

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

RESUMO

QUEIROZ, Bruno Pereira de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo de alta compressibilidade.** Orientadora: Rejane Nascentes. Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz e Maria Eugenia Gimenez Boscov.

É uma necessidade recorrente promover novos estudos a respeito de tecnologias e/ou metodologias inovadoras e econômicas em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, que reduza os custos de implantação dos aterros sanitário de pequeno porte. Neste trabalho foi estudado o comportamento mecânico e hidráulico de um solo argiloso de alta compressibilidade (CH) e de misturas de 3% e 5% de licor negro, e misturas com os mesmos teores de licor negro e 2% de cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32. O comportamento mecânico foi analisado a partir de ensaios de compressão simples em tempos de cura de 7 e 28 dias e ensaios de adensamento com taxa de deformação constante (CRS). O comportamento hidráulico foi analisado a partir de ensaios de percolação em coluna utilizando água destilada. Verificou-se que as misturas de licor e licor-cimento proporcionaram o aumento na massa específica aparente seca máxima de até 2,7% e redução do teor de umidade ótimo em 2,0% em relação ao solo natural. As misturas de licor negro apresentaram um bom desempenho à vista das propriedades hidráulicas contribuindo com a redução da permeabilidade na ordem de 10 vezes em relação ao solo natural, contudo tendem a reduzir a resistência à compressão simples. As misturas com licor-cimento CP II-E-32 não atuaram como bons estabilizantes à vista das propriedades hidráulicas e mecânicas das misturas, uma vez que as melhorias na permeabilidade não se mantiveram constantes no transcorrer dos ensaios, tampouco a resistência à compressão simples foi superior ao do solo natural. As misturas com licor-cimento CP II-F-32, apresentaram melhor desempenho como estabilizante à vista das propriedades hidráulicas e mecânicas, proporcionando redução na permeabilidade, que manteve praticamente constante no transcorrer dos ensaios, e aumento de 20% na resistência à compressão simples aos 28 dias de cura. Destaca-se que as misturas com licor-cimento CP II-F-32 apresentam uma maior tendência de ocorrer aumento de sucção em razão da redução do teor de umidade no processo de pega do cimento. Os ensaios de adensamento CRS indicam que as dosagens crescentes de licor negro tendem a aumentar a plasticidade das misturas, uma vez que foi observada a redução dos coeficientes de adensamento. Estes resultados puderam esclarecer questões referentes à utilização combinada do licor negro e cimento em barreiras de contenção de solos compactados e materiais semelhantes relacionados a esses temas.

Palavras-chave: Solos estabilizados. Barreiras de contenção. Licor negro kraft. Permeabilidade.

ABSTRACT

QUEIROZ, Bruno Pereira de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2021. **Effect of the combined stabilization of the kraft black liquor of pinus wood and cement on the mechanical and hydraulic properties of a highly compressible soil.** Adviser: Rejane Nascentes. Co-advisers: Roberto Lopes Ferraz and Maria Eugenia Gimenez Boscov.

It is a recurring need to promote new studies on innovative technologies and/or methodologies and to promote waterproofing liners of landfills, which reduces small landfills implementation costs. In this work, the mechanical and hydraulic properties of a high compressibility clayey soil (CH) and mixtures of 3% and 5% black liquor were studied, and mixtures with the same levels of black liquor and 2% of cements CP II-E-32 and CP II-F-32. The mechanical properties were analyzed from simple compaction tests in ripening of 7 and 28 days and constant rate-of-strain (CRS) consolidation tests. The hydraulic properties were analyzed from column percolation tests using distilled water. It was found that the mixtures of liquor and liquor-cement provided an increase in the maximum apparent dry specific mass of up to 2,7% and a reduction of the optimum moisture content by 2,0% in relation to the natural soil. The mixtures of black liquor black perform well in view of the hydraulic properties contributing to the reduction of permeability in the order of 10-fold in relation to the natural soil, however they tend to reduce the resistance to simple compression. Mixtures of liquor-cement CP II-E-32 weren't effective in view of the hydraulic and mechanical properties of the mixtures, since the improvements in permeability didn't remain constant during the tests, nor the resistance to compression simple was superior to that of natural soil. Mixtures of liquor-cement CP II-F-32 showed better performance as a stabilizer in view of the hydraulic and mechanical properties, providing a reduction in permeability, which remained practically constant during the tests, and a 20% increase in resistance to simple compression after 28 days of curing. It's noteworthy that mixtures of liquor-cement CP II-F-32 present a greater tendency to increase suction due to the reduction of moisture content in the cement setting process. The CRS consolidation tests indicate that the increasing dosages of black liquor tend to increase the mixtures plasticity, since the reduction of the consolidation coefficients was observed. These results were able to clarify issues regarding the combined use of black liquor and cement in liners of compacted soils and similar materials related to these themes.

Keywords: Stabilized soils. Liners. Kraft black liquor. Permeability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama esquemático da união das lâminas tetraédricas e octaédricas	34
FIGURA 2 – Distribuição das cargas reversíveis de óxidos em configuração octaédrica e metal trivalente	35
FIGURA 3 – Queda de potencial elétrico em função da distância das camadas de Stern e difusa	37
FIGURA 4 – Esquema de dupla camada em superfície de carga negativa	37
FIGURA 5 – Queda de potencial elétrico em função da distância das camadas de Stern e difusa	38
FIGURA 6 – Atração de moléculas dipolares na dupla camada difusa	38
FIGURA 7 – Fluxograma da metodologia adotada.....	41
FIGURA 8 – Localização do ponto de coleta de solo	42
FIGURA 9 – Peneiramento do solo na peneira com abertura de 4,8 mm	42
FIGURA 10 – Destorroamento do solo com os pés sobre bandeja metálica	42
FIGURA 11 – Preparo do solo sobre a lona para realizar a homogeneização	43
FIGURA 12 – Acondicionamento e armazenamento do solo tambores e bombonas identificados	43
FIGURA 13 – Licor negro kraft utilizado	44
FIGURA 14 – Esquematização: corte do molde	50
FIGURA 15 – Esquematização: detalhe da ranhura transversal	50
FIGURA 16 – Esquematização: sistemas radial e concêntrico de ranhuras na base.....	50
FIGURA 17 – Esquematização: ponto de entrada e saída de fluido percolante na base.....	50
FIGURA 18 – Esquematização: ponto de saída de fluido percolante e purgador na tampa – vista inferior	51
FIGURA 19 – Esquematização: ponto de saída de fluido percolante, purgador e base suporte para tubos de coleta na tampa – vista superior	51
FIGURA 20 – Esquematização no SketchUp: permeâmetro	51
FIGURA 21 – Esquematização no SketchUp: célula de interface – vista inferior.....	52
FIGURA 22 – Esquematização no SketchUp: célula de interface – vista superior	52
FIGURA 23 – Vista frontal dos painéis intercomunicantes à rede principal de ar comprimido	53
FIGURA 24 – Permeômetros com tubos para coleta do percolado protegidos com papel alumínio.....	53
FIGURA 25 – Vista frontal do sistema de percolação em coluna implementado por Caneschi (2012) em uso, com a realização simultânea de 21 permeômetros e sete células de interface.	54
FIGURA 26 – Corpos de prova dos ensaios de compressão simples recém moldados, embalados com filme PVC e identificados.....	55

FIGURA 27 – Corpos de prova dos ensaios de compressão simples armazenados na câmara úmida aguardando os tempos de cura.....	55
FIGURA 28 – Rompimento do quarto corpo de prova do segundo lote referência (R - D) com cura de 28 dias	56
FIGURA 29 – Segundo lote de corpos de prova referência rompidos (R - D, E, F e H)	56
FIGURA 30 – Topo de corpo de prova com 3% de licor negro kraft (3% – A) parcialmente desmoldado e acúmulo de componentes do licor em suas faces	57
FIGURA 31 – Parte impregnada por componentes do licor sendo eliminada durante talhagem de corpo de prova (3% - C) para ensaio de adensamento CRS	57
FIGURA 32 – Topo do anel com corpo de prova talhado (3% – A): face menos impregnada	58
FIGURA 33 – Topo do anel com corpo de prova talhado (3% – A): face mais impregnada ..	58
FIGURA 34 – Base da célula de adensamento CRS, evidenciando ponto de saída (A), registro (B) e conector (C).....	58
FIGURA 35 – Base da célula de adensamento CRS preenchida com água destilada e com a papel filtro e pedra porosa encaixados	58
FIGURA 36 – Câmara de pressão com corpos de prova inseridos sobre a base da célula	59
FIGURA 37 – Colar guia apoiado sobre borda biselada do anel e pedra porosa sobre corpo de prova	59
FIGURA 38 – O-rings na parte inferior da câmara de pressão e na face que entra em contato com o anel.....	59
FIGURA 39 – Célula de adensamento CRS montada, evidenciando conectores pneumáticos (D e E).....	59
FIGURA 40 – Início da fissuração no solo natural: presença de fissuras no centro e extremidades do corpo de prova.....	88
FIGURA 41 – Avanço da fissuração no solo natural: comunicação das fissuras do centro com as das extremidades do corpo de prova	88
FIGURA 42 – Início da fissuração na mistura com 3% de licor: presença de fissuras apenas no centro do corpo de prova	88
FIGURA 43 – Avanço da fissuração na mistura com 3% de licor: abertura das fissuras centrais e avanço para as extremidades.....	88
FIGURA 44 – Início da fissuração na mistura com 5% de licor: presença de fissuras apenas no centro do corpo de prova	88
FIGURA 45 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor: abertura das fissuras centrais e avanço para as extremidades.....	88
FIGURA 46 – Início da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32: presença de fissuras no centro e extremidade superior do corpo de prova.....	92
FIGURA 47 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32: encontro das fissuras do centro com as das extremidades.....	92
FIGURA 48 – Início da fissuração na mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32: presença de fissuras na base do corpo de prova e iniciando na parte central	92

FIGURA 49 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32: encontro das fissuras do centro com as das extremidades.....	92
FIGURA 50 – Desenvolvimento predominante de fungo em corpo de prova de licor-cimento CP II-F-32	93
FIGURA 51 – Desenvolvimento de fungo nas bordas de corpo de prova de licor-cimento CP II-F-32	93
FIGURA B.1 – 1º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (7 dias).....	116
FIGURA B.2 – 2º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (28 dias).....	117
FIGURA B.3 – 3º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (7 dias).....	117
FIGURA B.4 – 1º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (7 dias)	118
FIGURA B.5 – 2º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (28 dias)	119
FIGURA B.6 – 3º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (7 dias)	119
FIGURA B.7 – 4º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (28 dias)	120
FIGURA B.8 – 1º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (7 dias)	121
FIGURA B.9 – 2º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (28 dias)	121
FIGURA B.10 – 1º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)	122
FIGURA B.11 – 2º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)	123
FIGURA B.12 – 3º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)	123
FIGURA B.13 – 4º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)	124
FIGURA B.14 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (7 dias)	125
FIGURA B.15 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (28 dias)	125
FIGURA B.16 – 3º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (7 dias)	126
FIGURA B.17 – 4º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (28 dias)	127
FIGURA B.18 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (7 dias)	127
FIGURA B.19 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (28 dias)	128
FIGURA B.20 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)	129
FIGURA B.21 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)	129

FIGURA B.22 – 3º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)	130
FIGURA B.23 – 4º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)	131

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Evolução da produção de polpas celulósicas de madeira no Brasil – anos de 2011 a 2019	24
GRÁFICO 2 – Distribuição percentual das polpas celulósicas de madeira produzidas no Brasil – 2019	25
GRÁFICO 3 – Distribuição percentual das polpas químicas de madeira produzidas no Brasil – 2012	25
GRÁFICO 4 – Curva granulométrica: análise 1	64
GRÁFICO 5 – Curva granulométrica: análise 2	64
GRÁFICO 6 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas de 3% de licor e licor-cimento	65
GRÁFICO 7 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas de 5% de licor e licor-cimento	65
GRÁFICO 8 – Determinação do k_{20} em função do vpp para o solo natural, 0% licor kraft, sendo A, B e C repetições.....	71
GRÁFICO 9 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor kraft.....	71
GRÁFICO 10 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor kraft.....	71
GRÁFICO 11 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor-cimento CP II-E-32	72
GRÁFICO 12 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor-cimento CP II-E-32	72
GRÁFICO 13 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor-cimento CP II-F-32	72
GRÁFICO 14 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor-cimento CP II-F-32	72
GRÁFICO 15 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 3% licor-cimento CP II-E-32 e solo natural.....	73
GRÁFICO 16 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 5% licor-cimento CP II-E-32 e solo natural.....	73
GRÁFICO 17 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 3% licor-cimento CP II-F-32 e solo natural.....	74
GRÁFICO 18 – Atividade de Ca^{2+} em solução, como função do pH, em equilíbrio anortita-caulinita e calcita, para ambiente com $[\text{CO}_2] = 0,038\%$	80
GRÁFICO 19 – atividade de Al e suas espécies de hidrólise em equilíbrio com gibbsita	82
GRÁFICO 20 – Curva de compactação do solo natural e marcações referente aos parâmetros de compactação dos corpos de prova durante a moldagem e na ruptura.....	84
GRÁFICO 21 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural para testes de velocidade de ensaio	84

GRÁFICO A.1 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova do solo natural	109
GRÁFICO A.2 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova do solo natural	109
GRÁFICO A.3 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova do solo natural	109
GRÁFICO A.4 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova do solo natural	109
GRÁFICO A.5 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova do solo natural.....	109
GRÁFICO A.6 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova do solo natural	109
GRÁFICO A.7 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.8 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.9 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.10 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.11 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.12 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro	110
GRÁFICO A.13 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32.....	111
GRÁFICO A.14 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32	111
GRÁFICO A.15 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32.....	111
GRÁFICO A.16 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32	111
GRÁFICO A.17 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32	111
GRÁFICO A.18 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32	111
GRÁFICO A.19 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32.....	112
GRÁFICO A.20 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32	112
GRÁFICO A.21 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32.....	112
GRÁFICO A.22 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32	112
GRÁFICO A.23 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32	112

GRÁFICO A.24 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32	112
GRÁFICO A.25 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro	113
GRÁFICO A.26 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro	113
GRÁFICO A.27 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro.....	113
GRÁFICO A.28 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro	113
GRÁFICO A.29 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro	113
GRÁFICO A.30 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro	113
GRÁFICO A.31 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32.....	114
GRÁFICO A.32 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32	114
GRÁFICO A.33 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32.....	114
GRÁFICO A.34 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32	114
GRÁFICO A.35 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32	114
GRÁFICO A.36 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32	114
GRÁFICO A.37 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32	115
GRÁFICO A.38 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32	115
GRÁFICO A.39 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32.....	115
GRÁFICO A.40 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32	115
GRÁFICO A.41 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32	115
GRÁFICO A.42 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32	115
GRÁFICO B.1 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	116
GRÁFICO B.2 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural.....	116

GRÁFICO B.3 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	116
GRÁFICO B.4 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural	116
GRÁFICO B.5 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	117
GRÁFICO B.6 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural	117
GRÁFICO B.7 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	118
GRÁFICO B.8 – Resistência à compressão simples em corpos de prova da mistura 3% de licor negro	118
GRÁFICO B.9 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	118
GRÁFICO B.10 – Resistência à compressão simples em corpos de prova da mistura 3% de licor negro	118
GRÁFICO B.11 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	119
GRÁFICO B.12 – Resistência à compressão simples em corpos da mistura 3% de licor negro	119
GRÁFICO B.13 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	120
GRÁFICO B.14 – Resistência à compressão simples em corpos da mistura 3% de licor negro	120
GRÁFICO B.15 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	120
GRÁFICO B.16 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32	120
GRÁFICO B.17 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	121
GRÁFICO B.18 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32	121
GRÁFICO B.19 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	122
GRÁFICO B.20 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32	122
GRÁFICO B.21 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	122
GRÁFICO B.22 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32	122
GRÁFICO B.23 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	123

GRÁFICO B.24 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32	123
GRÁFICO B.25 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	124
GRÁFICO B.26 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32	124
GRÁFICO B.27 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	124
GRÁFICO B.28 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro	124
GRÁFICO B.29 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	125
GRÁFICO B.30 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro	125
GRÁFICO B.31 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	126
GRÁFICO B.32 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro	126
GRÁFICO B.33 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	126
GRÁFICO B.34 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro	126
GRÁFICO B.35 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	127
GRÁFICO B.36 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32	127
GRÁFICO B.37 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	128
GRÁFICO B.38 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32	128
GRÁFICO B.39 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	128
GRÁFICO B.40 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32	128
GRÁFICO B.41 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	129
GRÁFICO B.42 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32	129
GRÁFICO B.43 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	130
GRÁFICO B.44 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32	130

GRÁFICO B.45 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova	130
GRÁFICO B.46 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32	130
GRÁFICO C.1 – Curva de compressibilidade para solo natural.....	132
GRÁFICO C.2 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para solo natural	132
GRÁFICO C.3 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios do solo natural	132
GRÁFICO C.4 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva no solo natural	132
GRÁFICO C.5 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor negro	132
GRÁFICO C.6 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para mistura de 3% de licor negro.....	132
GRÁFICO C.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor negro	133
GRÁFICO C.8 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 3% de licor negro	133
GRÁFICO C.9 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32	133
GRÁFICO C.10 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 3% licor-cimento CP II-E-32	133
GRÁFICO C.11 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32	133
GRÁFICO C.12 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 3% licor-cimento CP II-E-32.....	133
GRÁFICO C.13 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor-cimento CP II-F-32	134
GRÁFICO C.14 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 3% licor-cimento CP II-F-32	134
GRÁFICO C.15 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor-cimento CP II-F-32	134
GRÁFICO C.16 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 3% licor-cimento CP II-F-32	134
GRÁFICO C.17 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor negro	134
GRÁFICO C.18 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para mistura de 5% de licor negro.....	134
GRÁFICO C.19 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor negro	135

GRÁFICO C.20 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 5% de licor negro	135
GRÁFICO C.21 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32	135
GRÁFICO C.22 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 5% licor-cimento CP II-E-32	135
GRÁFICO C.23 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32	135
GRÁFICO C.24 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 5% licor-cimento CP II-E-32	135
GRÁFICO C.25 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor-cimento CP II-F-32	136
GRÁFICO C.26 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 5% licor-cimento CP II-F-32	136
GRÁFICO C.27 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor-cimento CP II-F-32	136
GRÁFICO C.28 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 5% licor-cimento CP II-F-32	136

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição elementar típica dos sólidos do licor negro kraft.....	27
TABELA 2 – Resultados de análise elementar de diferentes licores negros	27
TABELA 3 – Classificação do tamanho das partículas	32
TABELA 4 – Classificação textural segundo a ABNT.....	33
TABELA 5 – Classificação textural segundo o DNIT	33
TABELA 6 – Distribuição dos corpos de prova moldados	46
TABELA 7 – Gradiente máximo recomendado em função de condutividade hidráulica do material	49
TABELA 8 – Recomendações para razão u_b/σ_v disponíveis na literatura	61
TABELA 9 – Recomendações da D4186/98 para velocidades de deformação em função do valor de LL	61
TABELA 10 – Determinação do teor de umidade solo-licor a 65°C	63
TABELA 11 – Determinação do teor de umidade solo-licor a 105°C	63
TABELA 12 – Determinação dos elementos analisados em espectroscopia de absorção atômica (mg/L).....	63
TABELA 13 – Resumo dos resultados da caracterização geotécnica do solo	64
TABELA 14 – Parâmetros ótimos e coeficiente de determinação das curvas de compactação do solo natural e das misturas de 3% de licor e licor-cimento	65
TABELA 15 – Parâmetros ótimos e coeficiente de determinação das curvas de compactação do solo natural e das misturas de 5% de licor e licor-cimento	65
TABELA 16 – Análise descritiva dos ensaios de permeabilidade das misturas para as repetições A, B e C	67
TABELA 17 – Parâmetro ótimos de compactação das misturas e os parâmetros obtidos na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade.....	70
TABELA 18 – Determinação de Na, K, Mg, Ca, Al e Si por espectroscopia de absorção atômica presentes no percolado, no licor negro e na água destilada utilizada no ensaio de permeabilidade	75
TABELA 19 – Relação dos valores de k_{20} , das concentrações de Na e Ca por espectroscopia de absorção atômica presentes no percolado e relação Na-Ca	79
TABELA 20 – Determinação da resistência à compressão simples do solo natural e das misturas, com tempos de cura de 7 e 28 dias.....	84
TABELA 20 – Parâmetros iniciais e finais dos ensaios de adensamento CRS.....	94
TABELA B.1 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural	116
TABELA B.2 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural	117
TABELA B.3 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural	117

TABELA B.4 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro	118
TABELA B.5 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro	119
TABELA B.6 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro	119
TABELA B.7 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro	120
TABELA B.8 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-E-32	121
TABELA B.9 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-E-32	121
TABELA B.10 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32	122
TABELA B.11 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32	123
TABELA B.12 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32	123
TABELA B.13 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32	124
TABELA B.14 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro	125
TABELA B.15 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro	125
TABELA B.16 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro	126
TABELA B.17 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro	127
TABELA B.18 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-E-32	127
TABELA B.19 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-E-32	128
TABELA B.20 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32	129
TABELA B.21 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32	129
TABELA B.22 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32	130
TABELA B.23 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32	131

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Hipótese	22
1.2. Justificativa	23
1.3. Objetivos	23
2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	24
2.1. Produção de polpas celulósicas	24
2.1.1. O licor negro kraft	25
2.2. O intemperismo no processo de formação dos solos	27
2.2.1. Intemperismo físico	27
2.2.2. Intemperismo químico	30
2.2.3. Intemperismo biológico	31
2.3. As frações constituintes do solo	31
2.3.1. As cargas presentes nas argilas	33
2.4. Estabilização dos solos	38
2.4.1. Estabilização química de misturas compactadas	39
3. METODOLOGIA	41
3.1. Etapa preparatória	41
3.1.1. Preparação das amostras de solo	41
3.1.2. Determinação do teor de umidade das misturas com adição do licor negro kraft	44
3.1.3. Preparação das misturas de solo-licor e solo-licor-cimento	45
3.2. Etapa de Coleta de dados	46
3.2.1. Moldagem de corpos de prova	46
3.2.2. Ensaio de permeabilidade	46
3.2.3. Ensaio de compressão simples	54
3.2.4. Ensaio de adensamento CRS	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1. Determinação do teor de umidade das misturas com adição do licor negro kraft	62
4.2. Caracterização química do licor negro kraft	63
4.3. Caracterização geotécnica do solo	63
4.4. Compactação das misturas de solo-licor e solo-licor-cimento	65
4.5. Ensaio de permeabilidade	67
4.5.1. Variação das concentrações de Na, K, Mg, Ca, Al e Si presentes no percolado dos ensaios de permeabilidade	74
4.6. Ensaio de Compressão Simples	83

4.6.1. Resistência do solo natural	85
4.6.2. Resistência das misturas com licor negro.....	86
4.6.3. Resistência das misturas com licor-cimento.....	90
4.7. Ensaios de adensamento CRS.....	93
5. CONCLUSÕES.....	97
Referências	99
APÊNDICES	108
APÊNDICE A – Variação das concentrações de Na, K, Mg, Ca, Al e Si presentes no percolado dos ensaios de permeabilidade.....	109
APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	116
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de adensamento CRS.....	132

1. INTRODUÇÃO

Um grande desafio na atualidade é a disposição adequada dos resíduos sólidos produzidos. A lei federal 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (PNRS), é responsável por definir a destinação final, de forma viável ao meio ambiente, dos resíduos sólidos urbanos, incluindo sua reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético. Pelo Plano Nacional é proposta a criação de metas para a eliminação e recuperação de lugares utilizados antes como lixões e aterros controlados, que deveriam ter sido encerrados em até quatro anos após a promulgação dessa lei.

O prazo para o encerramento de lixões e aterros controlados, promulgado pela lei 12305/2010, expirou, e diante do cenário gerado devido ao não cumprimento desta, o Senado submeteu o projeto de lei 2289/2015, prorrogando o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da lei 12.305/2010. Estabelecidos os novos prazos, os municípios com população inferior a 50 mil habitantes no Censo 2010 têm até 31 julho de 2021 para implementar a disposição final ambientalmente adequada.

Para execução de camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, por exemplo, a *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) promulgou em 1991 critérios federais mínimos, vigentes, revisados na Parte 258 - *Criteria for Municipal Solid Waste Landfills* no Título 40 do Código de Regulamentos Federais (CRF, 1991), que determina que a condutividade hidráulica em camadas de impermeabilização seja menor ou igual a 10^{-9} m/s. Em geral, essas camadas são compostas de solos compactados incluindo ou não geomembranas.

Tratando-se de municípios de pequeno porte, com geração de RSU igual ou inferior a 20 T/dia (ANBT, 2010), que algumas vezes apresentam orçamento reduzido, as empresas de engenharia que atuam na área ambiental têm enfrentado dificuldades técnicas durante execução de camadas de impermeabilização de aterros sanitários. Tendo em vista o alto custo de geomembranas, e pela adoção do critério da economicidade, muitas vezes, elas não são adotadas, sendo utilizado apenas o solo compactado para evitar a contaminação de águas subterrâneas.

Uma das alternativas para minimizar os impasses à adequação dos municípios com a PNRS, diminuindo os custos de implantação dos aterros sanitário, é executar camadas de impermeabilização empregando a combinação de técnicas de estabilização química e mecânica de forma que alterem as propriedades geotécnicas dos solos, a fim de atender satisfatoriamente condições de projeto.

Alguns estudos comprovaram que a condutividade hidráulica de barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários constituídas de camadas de solos compactados aumentou em até 1000 vezes quando em contato com o percolado do aterro (KACZMAREK, 1997; BOSCOV, 1997; NASCENTES, 2006). Dessa forma, para execução dessas camadas no campo, faz-se necessário estudar as propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos e de suas misturas, a fim de verificar a constância das melhorias nas propriedades geotécnicas do solo.

Em estudos anteriores, Vieira (1994) estudou o comportamento de solos siltosos e arenosos de Viçosa estabilizados com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários, e constatou efeitos promissores na estabilização conjunta de licor-cimento e licor-cal. Os estudos realizados em 2018 pelo autor desse estudo demonstram que um solo argiloso de alta compressibilidade (CH), uma vez compactado com o licor negro, sofre um aumento da massa específica aparente e, conseqüentemente uma redução do índice de vazios. Verificou-se ainda uma redução do coeficiente de permeabilidade na ordem de dez vezes nas misturas com 5% de licor negro e solo. Fundamentando-se nos estudos realizados por Vieira (1994) e Fernandes (2000), os quais verificaram que o emprego de 2% cimento pode proporcionar aumento na resistência à compressão simples nas misturas com licor negro concentrado e alcatrão de madeira, almejou-se estudar também o efeito da estabilização conjunta do licor negro kraft e os cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32 nas propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas compactadas.

1.1. Hipótese

Parte-se da hipótese de que o sulfato de sódio, o sulfito de sódio e os demais sais de sódio, que incluem carbonato de sódio, tiosulfato de sódio e silicato de sódio e a lignina de sódio, presentes no licor negro kraft têm efeito dispersivo nas partículas de argila do solo. Acredita-se, antecipadamente, que estes compostos misturados ao solo dissociam-se quando em contato com a água, liberando cátions de Na^+ . Assim, os cátions de sódio liberados podem interagir com os cátions intercambiáveis da dupla camada difusa, aumentando sua espessura e, por conseqüência, proporcionando a formação de estrutura dispersa nos solos. Dessa forma, espera-se que a adição de licor negro kraft ao solo promova aumento de sua massa específica seca máxima e redução do seu índice de vazios, proporcionando uma redução na permeabilidade do solo. Por fim, presume-se que o cimento possa influenciar no comportamento mecânico e hidráulico do solo, aumentando a resistência à compressão simples e reduzindo a compressibilidade e a permeabilidade.

1.2. Justificativa

Diante do exposto, vê-se a necessidade de promover novos estudos a respeito de tecnologias e/ou metodologias inovadoras em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários, buscando o emprego de tecnologias e metodologias viáveis economicamente.

O licor negro, resultante do processo de polpação para produção de celulose, é constituído por sulfato de sódio e sulfito de sódio, além de poder apresentar outros sais de sódio, que incluem carbonato de sódio, tiosulfato de sódio e silicato de sódio. As macromoléculas de lignina têm sódio incorporado, formando um produto intermediário, conhecido dentro da literatura por álcali de lignina, lignina de sódio (SOUZA, 2006; NONG; ZHOU; WANG, 2016). Segundo Nong, Zhou e Wang (2016), a lignina de sódio se dissocia em Na^+ e lignina na forma aniônica, e os sais de sódio se dissociam em Na^+ e ânions de ácidos orgânicos.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi analisar os efeitos da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo argiloso de alta compressibilidade.

Como objetivos específicos teve-se:

- i. proceder a estudos de dosagens de solo, cimento e licor negro kraft;
- ii. avaliar as diversas dosagens com relação às suas propriedades hidráulicas e o comportamento da permeabilidade ao longo do tempo; e
- iii. avaliar as diversas dosagens com relação à resistência à compressão simples à compressibilidade.

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

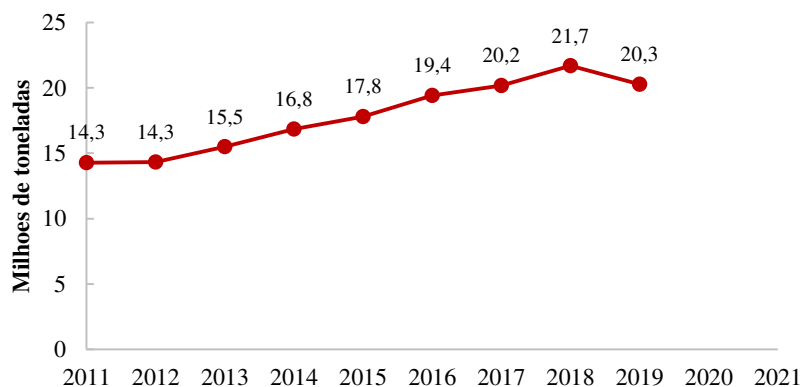
Conhecer os fatores que influenciam no comportamento hidráulico e mecânico dos solos e suas misturas é fundamental para a compreensão deste estudo proposto. Assim sendo, este capítulo apresenta uma revisão de estudos antepostos e os fundamentos teóricos que contribuem para o entendimento da permeabilidade e resistência dos solos. Serão abordados: a indústria da celulose e licor negro proveniente do processo kraft, os processos de formação de cargas no solo e as técnicas de estabilização química de solos.

2.1. Produção de polpas celulósicas

A madeira, estrutura biológica complexa composta de muitos tipos de células e substâncias químicas que atuam em conjunto para servir as necessidades de uma planta viva, sempre desempenhou um papel importante na atividade humana desde antes da história registrada. A madeira é um material importante desde as primeiras economias humanas, sendo empregada como matéria prima para diversos fins, como, agrícolas, habitacionais, navais, bélicos e, claro, energéticos (ROWELL, 2012). Atualmente a madeira é um recurso indispensável para produção de polpa celulósica para atender à demanda mundial por papel (FAVARO, 2015). A polpação é o processo pelo qual a madeira é reduzida a uma massa fibrosa, isto é, romper as ligações entre as estruturas da madeira, separando as fibras (GOMES; MAIA, 2013).

De acordo com dados da FAO (2020), em 2015, o Brasil ultrapassou o Canadá na produção de polpas celulósicas de madeira, e desde então ocupa o segundo lugar no *ranking* mundial, liderado pelos Estados Unidos. A produção nacional de polpas celulósicas de madeira aumentou na última década 51,9%, atingindo a marca de 21,7 milhões de toneladas em 2018.

GRÁFICO 1 – Evolução da produção de polpas celulósicas de madeira no Brasil – anos de 2011 a 2019

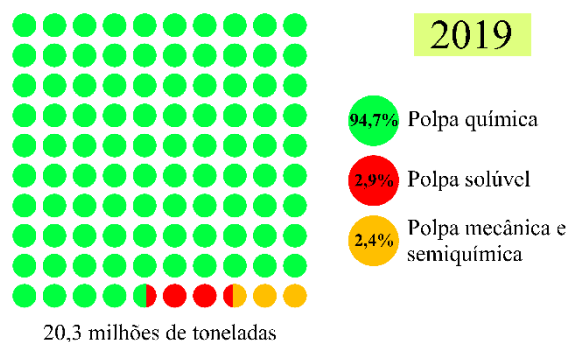


Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados apresentados na referência FAO, 2020.

Contudo, em 2019, a produção nacional registrou queda de 6,5% em relação ao ano anterior, sendo produzidas 20,3 milhões de toneladas, conforme apresentado no GRÁFICO 1.

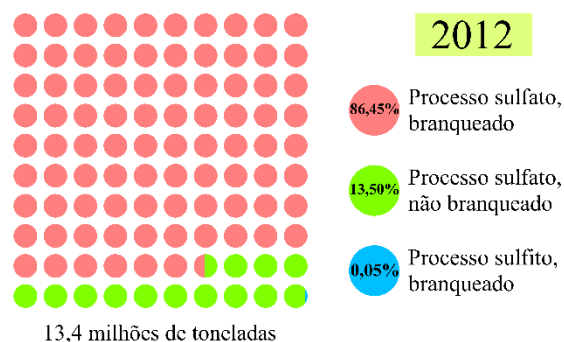
Dentre os processos de polpação, o mais utilizado no Brasil é o de polpação química. Em 2019, a produção brasileira de poupas químicas foi de 19,2 milhões de toneladas, representando 94,7% do total de polpas celulósicas produzidas, conforme o GRÁFICO 2. A produção de polpas químicas pode ser realizada a partir de três principais processos: processo soda, processo sulfato, também conhecido por processo kraft, e processo sulfito. Os registros da base de dados da FAO (2020) apontam que, desde 2013, 100% da produção de polpas químicas no Brasil tem sido realizada empregando o processo kraft. Em 2012, o processo sulfito foi empregado para a produção de apenas 0,05% dos 13,35 milhões de toneladas de polpa química produzidas naquele ano. A distribuição percentual de polpas químicas produzidas em 2012 é apresentada na GRÁFICO 3.

GRÁFICO 2 – Distribuição percentual das polpas celulósicas de madeira produzidas no Brasil – 2019



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados apresentados na referência FAO, 2020.

GRÁFICO 3 – Distribuição percentual das polpas químicas de madeira produzidas no Brasil – 2012



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados apresentados na referência FAO, 2020.

Os processo de polpação podem ser classificado em (D'ALMEIDA; 2013):

- i. processo mecânico;
- ii. processo termomecânico e quimiomecânico;
- iii. processo semiquímico;
- iv. processo químico de alto rendimento;
- v. processo químico; e
- vi. processo químico para polpa solúvel.

2.1.1. O licor negro kraft

A utilização de processo químico de separação das fibras não produz danos mecânicos

à superfície das fibras como os métodos mecânicos e semimecânicos, de modo que os papeis produzidos apresentam maior resistência, visto que as ligações entre fibras são mais fortes (TUTUS; ATES; DENIZ, 2010). Apesar das polpas celulósicas obtidas por processos químicos apresentarem maior resistência, geralmente o rendimento obtido para as principais espécies utilizadas é inferior aos processos mecânicos e semimecânicos, que podem atingir rendimentos superiores a 95% (D'ALMEIDA et al., 2013). O processo kraft de produção de celulose pode ser utilizado com várias espécies lignocelulósicas, sendo que, o rendimento obtido é de 40 a 45% para as coníferas e de 45 a 54% para as folhosas (SIXTA, 2006; D'ALMEIDA et al., 2013).

O cozimento kraft tem como premissa a individualização das fibras da madeira pela remoção da lignina (LONGUE JÚNIOR et al. 2009; FAVARO, 2015). Contudo, além da lignina, grande parte da hemicelulose presente nas paredes celulares também é removida (TUTUS; ATES; DENIZ, 2010). Nesse processo, a madeira sob a forma de cavacos é tratada em digestores com hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), conhecido por licor de cozimento ou licor branco, em pH acima de 12, visando dissolver a lignina e preservando a resistência das fibras. Outros compostos inorgânicos de sódio como, carbonato de sódio (Na₂CO₃), tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃), sulfito de sódio (Na₂SO₃) e sulfato de sódio (Na₂SO₄), também podem ser encontrados com frequência no licor de cozimento (recuperado) (SIXTA, 2006; D'ALMEIDA et al., 2013).

Após o cozimento, a mistura diluída de polpa é descarregada sob pressão reduzida em um tanque de descarga com o licor negro, que consiste no licor branco enriquecido com compostos orgânicos e inorgânicos da madeira degradada com uma concentração de íon hidróxido residual de cerca de 0,25 mol/L. Após a remoção dos nós por meio de peneiramento nas telas do atador, o licor negro é removido após a lavagem da polpa e posteriormente processado dentro da linha de recuperação (SIXTA, 2006).

A composição do licor negro kraft depende muito da espécie de madeira, da composição e da quantidade de licor branco utilizado, do rendimento da polpa não branqueada e da quantidade de filtrados do branqueamento (SIXTA, 2006). De modo geral, o licor negro é constituído de 63 a 69% de matéria orgânica e de 31 a 37% de matéria inorgânica em base seca (CARDOSO; OLIVEIRA; PASSOS, 2006). A fração orgânica é formada principalmente por fragmentos de lignina juntamente com ácidos carboxílicos alifáticos, originados da reação que ocorre durante o processo de cozimento da madeira e de extrativos da madeira, no entanto, em

quantidades menores (SIXTA, 2006; CARDOSO; OLIVEIRA; PASSOS, 2009). A fração inorgânica do licor negro está diretamente ligada majoritariamente aos compostos de sódio presentes no licor de cozimento (CRUZ, 2019). Na TABELA 1 é apresentado a composição típica elementar dos sólidos do licor negro, segundo Fakhrai (2002) e na TABELA 2 é apresentada a composição química elementar de licores negros provenientes de processos kraft e soda de diferentes indústrias (CARDOSO; OLIVEIRA; PASSOS, 2009).

TABELA 1 – Composição elementar típica dos sólidos do licor negro kraft

Elementos (% em massa seca de sólidos)								Total
C	H	Na	K	S	Cl	O	Inertes	
35,93	3,56	19,17	1,02	4,76	0,12	35,20	0,24	100,00

Fonte: adaptado de FAKHRAI, 2002.

TABELA 2 – Resultados de análise elementar de diferentes licores negros

Tipo de madeira processada	Localização da Indústria	Composição Elementar (% em massa seca de sólidos)							
		C	H	N	Na	K	S	Cl	Si
<i>Eucalyptus grandis</i>	Brasil/ Fabrica A (Processo kraft)	30,8	3,6	0,01	21,8	1,8	3,7	4,5	0,1
<i>Eucalyptus grandis</i>	Brasil/ Fabrica B (Processo kraft)	35,2	3,7	-	21,2	2,1	3	4,3	-
<i>Eucalyptus grandis</i>	Brasil/ Fabrica C (Processo kraft)	29,6	3,6	-	18,7	2,2	4,4	2,6	-
<i>Eucalyptus grandis</i>	Brasil/ Fabrica D (Processo kraft)	34,8	3,4	0,04	18,3	2,1	3,6	3,2	-
<i>Eucalyptus grandis</i>	Brasil/ Fabrica E (Processo kraft)	32,3 ± 0,3	3,1 ± 0,1	0,04 ± 0,1	23,5 ± 3,2	1,8 ± 0,3	4,9 ± 0,5	2,2 ± 0,3	-
<i>Bambusa vulgaris</i>	Brasil/ Fabrica F (Processo Soda)	35,4	3,6	0,3	19,3	3,3	0,2	1,3	3,8
<i>Pinus sylvestris e Pinus caribaea</i>	Escandinávia e América do Norte (Processo kraft)	33,9 a 35,8	3,3 a 3,6	0,06 a 0,07	17,2 a 19,8	1,4 a 2,2	4,6 a 5,7	0,3 a 0,9	-
Hardwood	Escandinávia (Processo kraft)	33,2	3,3	0,08	20,8	2,6	5,2	0,3	-
Hardwood/ Eucalyptus	América do Norte (Processo kraft)	37,3	3,6	0,09	17,3	1,8	3,4	1,6	-
Palha	América do Sul (Processo soda)	39,1	4,5	1	8,8	4,1	0,8	3,5	0,23

Fonte: adaptado de CARDOSO; OLIVEIRA; PASSOS, 2009.

2.2. O intemperismo no processo de formação dos solos

A formação do solo inicia após a deposição do material original não consolidado em uma paisagem estável ou após a exposição da rocha na superfície terrestre e progride com o passar do tempo (OLSON, 2005). O conjunto de processos de ordem física, química e biológica que atuam sobre a rocha exposta na superfície terrestre ou próxima dela, promovendo sua desagregação e alteração química é conhecido por intemperismo (FONTES, 2012).

2.2.1. Intemperismo físico

O intemperismo físico consiste no conjunto de processos os quais provocam a cominuição da rocha, ou seja, a fragmentação, sem que haja qualquer modificação química ou mineralógica em sua composição, podendo ser subdividido em termal e mecânico (MARQUES, 1998 apud SANTIAGO, 2008; FONTES, 2012). O mecanismo que atua em todos os processos de intemperismo físico é o estabelecimento de tensões no interior da rocha suficientes para que ela se rompa (BIRKELAND, 1999).

O intemperismo físico termal é o processo de desagregação em virtude da variação de temperatura, provocada pela radiação solar (FONTES, 2012).

Durante as duas décadas subsequentes a 1870, os efeitos da radiação solar sobre as rochas foram contestados pela comunidade científica, posto que escritores da área de geologia até então consideravam seus efeitos como um dos possíveis ou até mesmo prováveis causas da desagregação das rochas. Em 1869, o paleontólogo Shaler Southgate Shaler desagradou autores subsequentes com a formulação a respeito da diferença de deformação sofrida pelas superfícies de uma mesa de granito (BLACKWELDER, 1933). De acordo com Shaler (1869), a superfície exposta à radiação solar tende a se expandir, enquanto que a superfície oposta permanece inalterada, de modo que, se a dilatação superar a coesão dos materiais, há a desagregação destes (apud BLACKWELDER, 1933).

As rochas possuem heterogeneidade mineralógica e granulométrica. Ademais, os minerais apresentam coeficientes de dilatação volumétrica diferentes, de modo que a exposição solar faz com que estes expandam e contraíam sob diferentes proporções, proporcionando a longo prazo, esforços suficientes para enfraquecer as ligações entre os minerais (BLACKWELDER, 1933; TERRA, 1933; TOLETO; OLIVEIRA; MELFI, 2009; FONTES, 2012; BARBOSA, 2014).

A cor das rochas também é uma característica que influencia na atuação do intemperismo físico termal, verificando maior efeito desse tipo de intemperismo em rochas mais escuras que e em rochas claras. A energia térmica solar é em boa parte refletida por rochas claras, enquanto que em rochas escuras essa energia é absorvida e transformada em calor (FONTES, 2012).

Diante do exposto, os minerais que apresentam maior tamanho dos cristais, os localizados mais próximos à superfície da rocha, os que apresentam coloração mais escura, e os que possuem maior coeficiente de dilatação volumétrica tendem a apresentar maiores deformações quando submetidos a alterações de temperatura, tornando o corpo rochoso mais suscetível à

desagregação.

A radiação solar é capaz de aquecer as rochas 1,5 até 2,5 vezes mais que a atmosfera, de modo que, ao longo do dia, atinjam temperaturas máximas acima de 60°C e mínimas de 20°C. As temperaturas mínimas podem atingir valores ainda menores que o apresentado, podendo chegar até 10°C em algumas regiões e 0°C em outras (LEINZ; AMARAL, 2001).

Em trabalho publicado por Kessler (1919), foi descrito um ligeiro aumento no comprimento de barras de mármore aquecidas a várias temperaturas e depois resfriadas lentamente até a temperatura inicial, evidenciando que as rochas, em geral, sofrem deformações permanentes e acumulam tensão de expansão devido a repetidos aquecimentos. Segundo Terra (1933), as mudanças de temperatura não precisam ser grandes ou repentinas para serem eficazes, de forma que alterações lentas e uma faixa moderada devem ser igualmente eficazes, embora exijam mais tempo.

O intemperismo físico mecânico é o processo de desagregação em virtude de quaisquer esforços mecânicos aos quais a rocha esteja submetida, tais como: ação de gelo e degelo, exposição superficial da rocha e cristalização de sais (FONTES, 2012).

A água congelada no interior das fendas e poros das rochas, durante os ciclos de gelo e degelo, pode exercer um acréscimo de tensões suficientes para que essas se rompam, uma vez que o aumento de volume devido à solidificação da água é da ordem de 9%. A degradação das rochas por meio desse processo pode ser mais eficaz em ambientes nos quais as temperaturas variem próximas de 0 °C muitas vezes ao ano (MELLOR, 1970; MCGREEVY, 1981; BIRKELAND, 1999; TOLETO; OLIVEIRA; MELFI, 2009; FONTES, 2012). A tensão de congelamento aumenta com o aumento da saturação e da taxa de congelamento, podendo ser suficiente para causar rachaduras no interior da rocha quando a saturação atinge valores acima de 50% (MELLOR, 1970).

As rochas, quando formadas debaixo da superfície terrestre, estão sujeitas a grandes pressões confinantes, que diminuem quando estas são expostas à superfície devido a erosão da massa rochosa sobreposta (BIRKELAND, 1999; FONTES, 2012). A liberação de tensões contidas nas rochas ocorre devido à redução de pressão confinante, permitindo que estas se expandam em direção da liberação de pressão e se rompam em planos perpendiculares à direção dessa liberação de pressão (BIRKELAND, 1999).

A presença de soluções salinas no interior de poros e trincas das rochas podem leva-las à ruptura, sendo mencionados na literatura dois processos principais. O primeiro processo é

devido à cristalização de sais presentes na solução, resultando em um aumento de pressão interior e subsequentemente na ruptura. O segundo processo é a expansão dos cristais, que pode ocorrer por hidratação ou dilatação térmica (COOKE; SMALLEY, 1968; GOUDIE; COOKE; EVANS, 1970; BIRKELAND, 1999; TOLETO; OLIVEIRA; MELFI, 2009; FONTES, 2012). Goudie, Cook e Evans (1970), observaram que o desenvolvimento de cristais e sua expansão devido à hidratação exercem pressões de até 47 bar (4,7 MPa) e 63 bar (6,3 MPa), respectivamente, enquanto que as tensões de tração suportadas pelas rochas são geralmente entre 20 e 200 bares.

2.2.2. Intemperismo químico

O intemperismo químico consiste no conjunto de processos os quais alteram a composição química e/ou mineralógica das rochas, caracterizado pela conversão química de minerais primários, presentes nas frações areia e silte, em minerais secundários na fração argila (FONTES, 2012).

Podem ser definidos três mecanismos principais que atuam em nos processos de intemperismo químico: troca de cátions, hidratação e oxidação. O primeiro refere-se ao deslocamento de cátions básicos ligados às estruturas cristalinas dos minerais por cátions de solução, mais notavelmente H^+ proveniente da dissociação de água ou ácido carbônico. O segundo, à incorporação de água à estrutura do mineral por processos que hidrolisam as ligações metal-oxigênio. O terceiro, à perda de elétrons do mineral, geralmente no oxigênio molecular (MCBRIDE, 1994).

Podem ocorrer ainda reações isoladas ou simultâneas de dissolução, redução e hidrólise, sendo a hidrólise, decisivamente, a mais importante reação de alteração dos minerais silicatados, sobretudo dos feldspatos (MCBRIDE, 1994; FONTES, 2012). A hidrólise é uma reação química na qual estão presentes H^+ e OH^- provenientes da ionização da água, podendo ser tanto congruente, isto é, quando o mineral é completamente solubilizado, quanto incongruente, quando parte dos produtos da reação precipitam formando novos minerais (FONTES, 2012).

A atuação do intemperismo químico sobre as rochas promove uma redução na taxa de mobilidade relativa dos principais elementos químicos constituintes a partir do Ca e Na para Mg, K, Si, Fe e Al, empobrecendo-as nos primeiros e apresentando um relativo enriquecimento nas proporções dos óxidos de Fe, Al e Si (FERREIRA, 2013).

A água é o principal agente do intemperismo químico, sendo seu efeito sobre os minerais

intensificado a medida que se acidifica devido à dissolução de dióxido de carbono da atmosfera e à presença de ácidos orgânicos advindos de materiais orgânicos (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2009; FONTES, 2012).

O intemperismo físico atua de modo que promove a redução do tamanho das partículas e, portanto, aumentando sua área superficial específica, tornando-as mais suscetíveis a reações químicas rápidas (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2009; WEIL; BRADY, 2017). Essa grande contribuição do intemperismo físico para o intemperismo químico implica, que o primeiro, por ser um processo mais rápido e que aumenta a superfície de exposição, pode ser considerado como controlador do segundo.

2.2.3. Intemperismo biológico

As ações que promovem a fragmentação ou a alteração dos minerais e das rochas pelos organismos vivos, desde bactérias e fungos até plantas e animais, podem ser físicas ou químicas. Contudo, uma vez que esses processos de intemperismo são resultantes da ação dos organismos, pode-se diferenciá-los adicionalmente como intemperismo biológico. (FONTES, 2012).

O fracionamento de minerais e rochas ocasionados por pequenos animais ou pelo crescimento e penetração de raízes em fendas de solos e rochas são ações físicas de natureza mecânica. Já a dissolução de CO_2 da respiração dos organismos na água e a absorção de nutrientes básicos, com uma conseqüente extrusão de prótons, provocam diminuição do pH, intensificando a atuação da hidrólise, que é uma das principais reações do intemperismo químico (FONTES, 2012).

Outro processo biológico que contribui para a desestabilização dos minerais e rochas, tornando-os mais fáceis de decompor, é a quelatação. Os quelatos produzidos pelos organismos têm a habilidade de aprisionar cátions metálicos por uma ou mais de suas ligações químicas, formando complexos metálicos estáveis e, tratando-se das rochas, esse processo favorece a remoção dos cátions metálicos da estrutura cristalina de seus minerais constituintes (FONTES, 2012; HARRIS, 2016).

2.3. As frações constituintes do solo

Os processos de intemperismo e os pedológicos são responsáveis pela formação dos solos que, em consequência, são misturas de pequenas partículas que se diferenciam pelo tamanho e pela composição química. A concentração de cada tipo de partícula em um solo depende

da composição química da rocha que lhe deu origem (PINTO, 2006).

À vista disso, para classificar os solos quanto ao tamanho de suas partículas, antes, é necessário organizá-las em frações do solo. Algumas denominações são empregadas para especificar essas frações: pedregulhos, areias, siltes, argilas.

Os pedregulhos são fragmentos de rochas compostos por quartzo, feldspato e outros minerais, podendo ser chamados de cascalho ou seixo se apresentarem o formato arredondado ou semi-arredondado. As areias são partículas constituídas principalmente por quartzo e feldspato, dando a sensação de aspereza e não apresentando nem coesão, nem plasticidade (ABNT, 1995a; DAS, 2011).

Os siltes e as argilas são as frações microscópicas do solo, assemelhando-se a mesma sensação tátil do talco. Os siltes consistem em grãos de quartzo bem refinados e fragmentos de minerais micáceos na configuração de placas, apresentando baixa ou nenhuma plasticidade e pouca resistência quando secos o ar. As argilas são constituídas essencialmente por partículas lamelares, de tamanho, também, submicroscópico, de mica, argilo minerais e outros minerais, e apresentam coesão e plasticidade (ABNT, 1995a; ALMEIDA, 2005; DAS, 2011).

A fim de classificar os solos quanto ao tamanho da partículas, algumas organizações norte-americanas estabeleceram limites de tamanho para separação dessas frações de solo, como pode ser observado na TABELA 3:

TABELA 3 – Classificação do tamanho das partículas

Nome da organização	Tamanho do grão (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,002
Associação Americana de Rodovias Estaduais e autoridades de Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,002
Sistema Unificado de Classificação de Solos (Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, Buereau de Reclamações dos Estados Unidos e Sociedade Americana para Testes e Materiais)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Grãos finos (por exemplo, silte e argilas) < 0,075	

Fonte: DAS, 2011.

Os limites convencionais superiores e inferiores das dimensões das partículas, geralmente, variam conforme o critério e as necessidades das organizações tecnológicas e normativas (DNIT, 2006). Nas TABELAS 4 e 5 são apresentados os limites adotados pela ABNT,

organização normativa, e pelo DNIT, organização tecnológica que adota limites iguais aos definidos pelo sistema unificado:

TABELA 4 – Classificação textural segundo a ABNT

Fração	Tamanho da partícula (mm)
Pedregulho	60,0 a 2,0
Areia grossa	2,0 a 0,6
Areia média	0,6 a 0,2
Areia fina	0,2 a 0,06
Silte	0,06 a 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: ABNT, 1995a.

TABELA 5 – Classificação textural segundo o DNIT

Fração	Tamanho da partícula (mm)
Pedregulho	3” a 2,0
Areia grossa	2,0 a 0,42
Areia fina	0,42 a 0,075
Silte	0,075 a 0,005
Argila	< 0,005
Argila coloidal	< 0,001

Fonte: DNIT, 2006.

2.3.1. As cargas presentes nas argilas

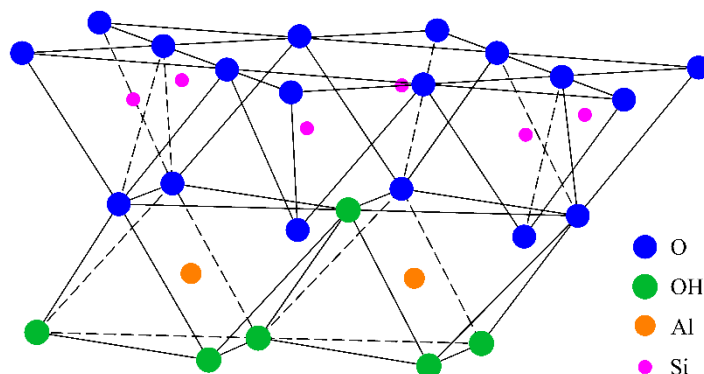
As superfícies das partículas do solo apresentam cargas elétricas, de modo que essas superfícies podem apresentar um excesso ou um déficit de elétrons (UEHARA; GILLMAN, 1981). Se as cargas forem resultado de imperfeições internas e substituições isomórficas estruturais, tem-se que a densidade de cargas é constante, ao passo que se as cargas forem criadas por uma interface com carga reversível, a densidade de cargas é variável (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001). As partículas de argila podem apresentar cargas variáveis em suas extremidades, bem como cargas negativas em sua superfície devido a substituições isomórficas (PINTO, 2006; DAS, 2011; DELAVI, 2011).

As argilas são constituídas por duas unidades básicas, sendo uma de átomos de silício ligados a quatro átomos de oxigênio e hidroxilas, formando uma lâmina de tetraedros justapostos, e outra de átomos de alumínio, ferro e magnésio ligados a átomos de oxigênio e hidroxilas dispostos em coordenação octaédrica (MURRAY, 2006). Esses dois arranjos ligam-se por meio dos átomos de oxigênio que pertencem simultaneamente a ambos (PINTO, 2006), como pode ser observado na FIGURA 1.

Quando a lâmina octaédrica é ocupada por átomos de alumínio, cátion trivalente, apenas dois terços das possíveis posições são preenchidas a fim de equilibrar as cargas e, o mineral é denominado dioctaedral. Por sua vez, quando a lâmina octaédrica é ocupada por magnésio ou ferro divalente, todas as posições são preenchidas e, o mineral é denominado trioctaedral (MURRAY, 2006).

Algumas vezes, átomos de menor valência podem substituir os átomos de alumínio e de silício no interior das lâminas tetraédricas e octaédricas, respectivamente, como, por exemplo,

FIGURA 1 – Diagrama esquemático da união das lâminas tetraédricas e octaédricas



Fonte: adaptado de MURRAY, 2006.

a substituição de átomos de silício por átomos de alumínio na estrutura tetraédrica e, a substituição dos átomos de alumínio ou ferro trivalente por magnésio na estrutura octaédrica (MCBRIDE, 1989; PINTO, 2006; DAS, 2011). Essas alterações são conhecidas por substituições isomórficas, dado que a substituição do cátion central não exerce alteração no arranjo estrutural (PINTO, 2006; DAS, 2011).

As substituições isomórficas ocorrem na diferenciação magmática no processo de formação dos minerais primários e, nos secundários, em sua formação no solo ou pela herança de minerais primários. Ainda, produzem cargas permanentes no mineral, também denominada por carga estrutural, e que se manifestam independente do pH do solo. As cargas produzidas pela substituição isomórfica são inerentes ao mineral e significativas apenas em minerais argilosos silicatados do tipo 2:1 e em alguns poucos minerais primários como, por exemplo, micas, quando atingem tamanho suficiente para compor a fração argila dos solos (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

A carga permanente, teoricamente, pode ser tanto negativa quanto positiva, contudo, devidos às dimensões iônicas, geralmente, um cátion de menor valência substitui outro de maior valência, ocasionando um déficit de carga positiva na estrutura cristalina e, por consequência, a manifestação de carga negativa na superfície da partícula (GAST, 1977, apud FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001; CUNHA et al., 2014). Tessens e Zauyah (1982) investigaram a existência de carga permanente positiva em latossolos altamente intemperizados e observaram que cargas permanentes positivas e negativas podem coexistir em um mesmo solo, relacionando a presença dessas cargas positivas à substituição isomórfica de Fe^{3+} por Ti^{4+} na estrutura dos óxidos de ferro.

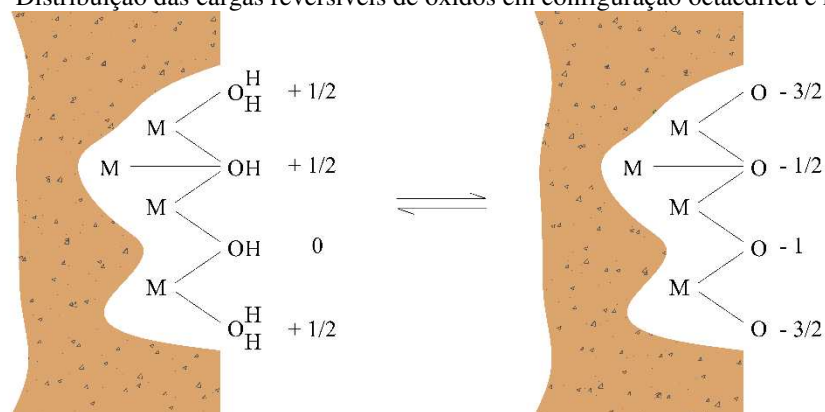
A carga variável é originária da adsorção de íons capazes de interferir na carga superficial do mineral, sendo chamados íons determinantes de potencial (IDP), sendo o H^+ e o OH^- os

principais íons determinantes de potencial na solução do solo. Pelo fato do H^+ e o OH^- serem os principais íons determinantes de potencial, estas cargas são conhecidas também por cargas dependentes de pH. Uma característica fundamental para a formação e desenvolvimento de cargas variável é a possibilidade da hidroxilação da sua superfície, sendo a caulinita, a goethita, a hematita e a gibbsita os principais minerais do solo que apresentam essa característica (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Durante o processo de hidratação dos óxidos, os íons Si, Al ou Fe localizados na superfície do mineral, completam sua camada de coordenação com grupos OH, podendo estar coordenados a um, dois ou três metais na estrutura do mineral, de modo que toda superfície se torne hidroxilada (STUMM, 1992). Essas hidroxilas podem ser chamadas de hidroxilas de coordenação simples, dupla ou tripla, e uma vez que submetidas à protonação ou desprotonação há o surgimento de cargas reversíveis (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Na FIGURA 2 é representada a distribuição das cargas extremas que ocorre na superfície de óxidos em configuração octaédrica e metal trivalente, sendo o máximo de cargas positivas devido à protonação dos grupos OH, no sentido reverso da reação, e o máximo de cargas negativas devido à desprotonação dos grupos OH, no sentido direto. Entre os extremos de carga positiva e negativa há um ponto em que a carga é nula, que pode ser pela ausência de cargas ou pelo fato das quantidades de carga positiva e negativa serem iguais. Esse ponto é denominado genericamente de ponto de carga zero (PCZ) (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

FIGURA 2 – Distribuição das cargas reversíveis de óxidos em configuração octaédrica e metal trivalente



Fonte: adaptado de FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001.

2.3.1.1. A potencial elétrico e a dupla camada difusa

Em argila seca, as cargas negativas na superfície da partícula são neutralizada por camadas contíguas de cátions intercambiáveis, como, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , rodeando as partículas mantidas por atração eletrostática (DAS, 2011). Na presença de água, as partículas de argila

atingem um estado coloidal, isto é, os cátions, uma vez no estado hidratado, ficam rodeados por uma camada de moléculas de água vibrando constantemente em um agrupamento próximo à superfície do colóide, sendo mantidos por atração eletrostática às cargas negativas do colóide (WEIL; BRADY, 2017).

O estado coloidal, via de regra, é um sistema de duas fases, em que partículas menores que 1 μm de diâmetro encontram-se dispersos em outra solução. Contudo, apesar das partículas de argila atingirem tamanho máximo de 2 μm , algumas argilas maiores também podem possuir características coloidais, como os óxidos, caulinitas e montmorilonitas (WEIL; BRADY, 2017).

A estabilização eletrostática do colóide é consequência da presença de uma camada de cátions agrupados à superfície da partícula e da camada móvel de íons presente na solução de solo, designada camada difusa (HOTZA, 1997). Frequentemente, um cátion individual se desprende dos demais próximos da superfície e se move em direção à solução do solo, de modo que outro cátion de carga igual, simultaneamente, se move da solução do solo para substituí-lo. Esse processo é denominado troca catiônica (WEIL; BRADY, 2017).

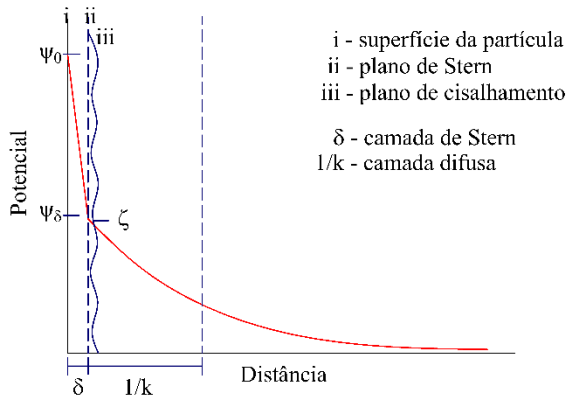
Os cátions, também chamados de contraíons, são atraídos pelo potencial elétrico na superfície dos colóides do solo, denominado potencial de Nerst (ψ_0) (OLIVEIRA et al., 2000; DELAVI, 2011). Esse potencial é variável se as cargas forem resultado de imperfeições internas e substituições isomórficas estruturais, o potencial elétrico de superfície é constante se as cargas forem criadas por uma interface com carga reversível, e é determinado somente pela concentração ou atividade desses íons em solução (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Devido à limitação espacial da superfície do colóide, apenas um número limitado de cátions consegue ser adsorvido pelo colóide, de modo que não são capazes de neutralizar completamente a carga superficial e apenas reduzem linearmente o potencial elétrico na superfície da partícula (ψ_0) para o denominado potencial de Stern (ψ_δ), conforme apresentado na FIGURA 3. O potencial de Stern também atrai cátions para a região do colóide, entretanto estes são fracamente ligados à partícula devido ao efeito repulsivo dos cátions de mesma carga que já foram adsorvidos na camada de Stern. Dessa forma, a concentração de cátions ao redor da camada de Stern se reduz suavemente em função da distância, originando a chamada camada difusa (DELAVI, 2011; PICCININI, 2013).

Os cátions adsorvidos à superfície do colóide, localizados da camada de Stern, encontram-se imóveis, entretanto, além do limite estabelecido por eles é definido um plano limite de

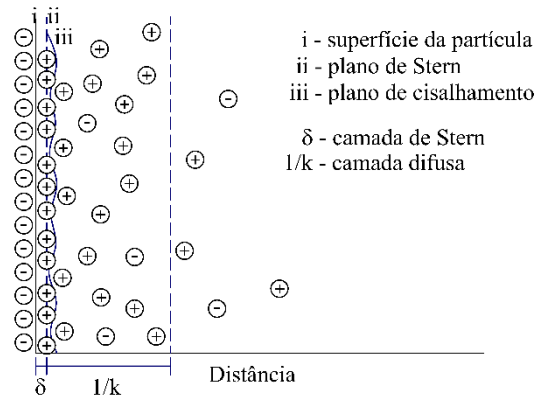
escoamento, ou plano de cisalhamento. O potencial neste plano é referido como potencial eletrocinético, dito potencial zeta (ζ) (PICCININI, 2013). A partir da FIGURA 4 é possível observar o plano de Stern e o plano de cisalhamento.

FIGURA 3 – Queda de potencial elétrico em função da distância das camadas de Stern e difusa



Fonte: adaptado de DELAVI, 2011.

FIGURA 4 – Esquema de dupla camada em superfície de carga negativa



Fonte: adaptado de HOTZA, 1997.

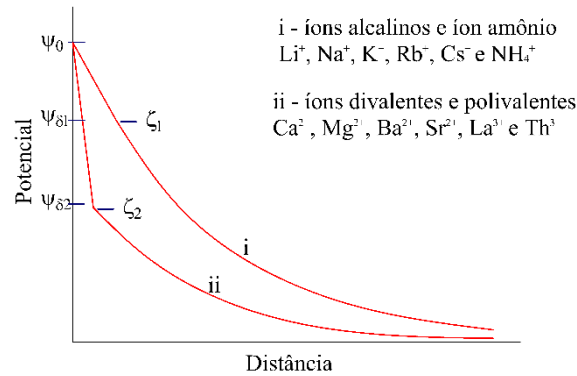
A magnitude do potencial zeta infere na provável estabilidade de um sistema coloidal, visto que quanto maior for o potencial zeta, maior será a tendência das partículas a se repelirem umas às outras, superando a tendência natural à agregação (DELAVI, 2011). Diante disso, a determinação do potencial zeta permite quantificar a força de repulsão entre as partículas, sendo esta tanto mais intensa quanto maior for o valor absoluto do potencial zeta (ROCHA, 2007).

O potencial zeta varia de acordo com a natureza e concentração dos contraíons, devido à espessura da dupla camada formada por eles. Em baixas concentrações, íons alcalinos, tais como, Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ e o íon amônio, NH_4^+ , proporcionam um alto potencial zeta, uma vez que a espessura da dupla camada formada é grande, exceto o íon H^+ , por ser um íon determinante de potencial e, portanto, sua capacidade de modificar o potencial de Nerst. Em contrapartida, os íons divalentes e polivalentes, por exemplo, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , La^{3+} e Th^{3+} , em razão da maior carga elétrica e menor raio iônico, reduzem a espessura, proporcionando um baixo potencial zeta (ROCHA, 2007), como pode ser observado na FIGURA 5.

Contudo, grandes concentrações, independente da valência do íon, causam uma redução do potencial zeta, uma vez que o aumento da concentração dos contraíons promove uma redução na espessura da dupla camada, diminuindo, portanto, o potencial (ROCHA, 2007).

As moléculas de água também sofrem atração devido o potencial elétrico na superfície da partícula (ψ_0) e pelo potencial de Stern (ψ_δ). A axissimetria dos átomos de hidrogênio em

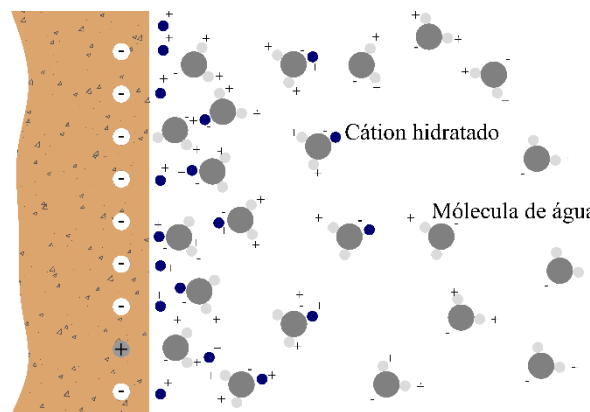
FIGURA 5 – Queda de potencial elétrico em função da distância das camadas de Stern e difusa



Fonte: adaptado de DELAVI, 2011.

volta do átomo de oxigênio, devido ao seu par de elétrons não compartilhado, faz com que a molécula de água forme um dipolo, apresentando carga positiva de um lado e carga negativa do outro. Dessa forma, a molécula de água é atraída tanto pelas cargas negativas das partículas de argila, quanto pelos cátions presentes na camada de Stern. A ponte de hidrogênio também desempenha outro fator na atração das moléculas de água para a superfície da partícula de argila, em que os átomos de hidrogênio das moléculas de água são compartilhados com átomos de oxigênio na superfície da argila (DAS, 2011). Todas essas formas de atração das molécula de água pela partícula de argila são apresentadas na FIGURA 6.

FIGURA 6 – Atração de moléculas dipolares na dupla camada difusa



Fonte: adaptado de DAS, 2011.

2.4. Estabilização dos solos

A estabilização dos solos consiste na alteração das propriedades geotécnicas dos solos, a partir de processos artificiais ou naturais, a fim de melhorar as propriedades geotécnicas dos solos, no que diz respeito à estabilidade, resistência, durabilidade e permeabilidade, de forma que atendam satisfatoriamente às solicitações previstas em projeto e que garantam constância

dessas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia (INGLES; METCALF, 1972; LIMA, 1981). Com o propósito de atingi-la, normalmente são recorridos tratamentos mecânicos, elétricos, térmicos e químicos (LAMBE; MICHAELS, 1954). Os tratamentos podem ser empregados separadamente, mas, usualmente depara-se com a combinação entre eles, principalmente entre as técnicas de estabilização química e mecânica.

Os métodos de estabilização dividem-se em três grandes grupos: estabilizadores químicos, que modificam as propriedades do solo por meio de aditivos sólidos ou líquidos; estabilizadores físicos, que modificam as propriedades do solo mediante calor e eletricidade; e estabilizadores mecânicos, que melhoram os solos pelo uso de métodos que não afetam as propriedades inerentes do próprio solo, tais como granulometria, mineralogia, massa específica das partículas e cor (INGLES; METCALF, 1972). A escolha do tipo de técnica a ser adotada para estabilizar o solo depende das propriedades geotécnicas deste, da finalidade, das opções disponíveis de materiais, equipamentos e profissionais, das exigências de projeto e da viabilidade técnica e econômica das opções disponíveis (BRITO; PARANHOS, 2017).

2.4.1. Estabilização química de misturas compactadas

Um agente químico, que permite alterar o caráter adsorvente ou elétrico das superfícies das partículas do solo, atua como estabilizante químico de um solo, quando, ao ser adicionado a este, modifica suas propriedades físicas e químicas, agindo como impermeabilizante, floculante ou dispersante dos materiais presentes no solo (LAMBE; MICHAELS, 1954). A fração de argila exerce grande influência nos processos de estabilização química dos solos, visto que esta é a principal origem dos fenômenos físico-químicos que se processam no solo (FERRAZ, 1994).

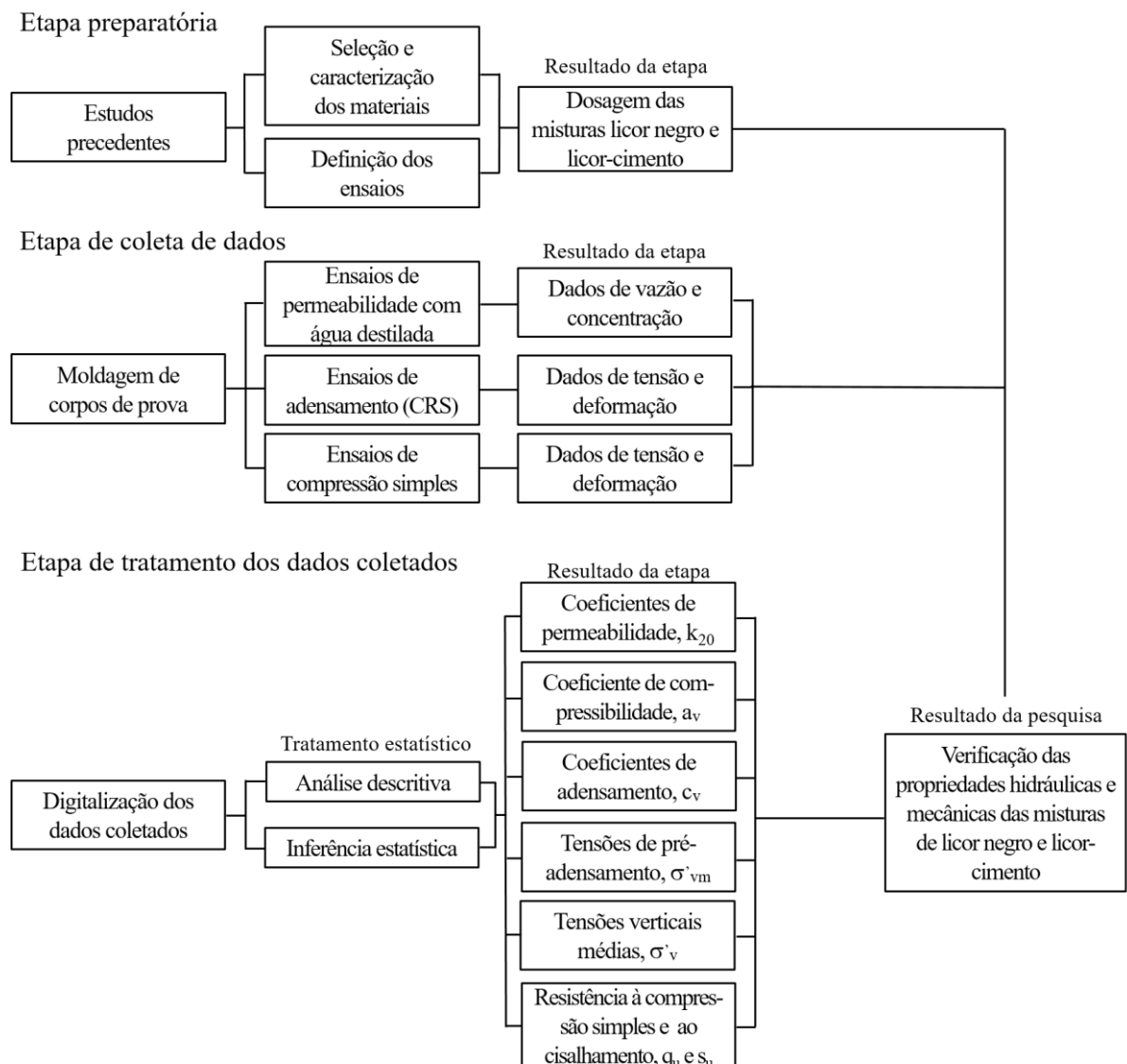
Conforme abordado na seção anterior, as cargas na superfície das partículas de argilas são neutralizadas por camadas contíguas de cátions intercambiáveis. O princípio da estabilização química é atuar sobre essas camadas de cátions, aumentando ou diminuindo as forças repulsivas eletrostáticas, de maneira que favoreça, respectivamente, a formação de estrutura dispersa ou floculada nos solos, contribuindo para a formação de ligações de cimentação. As camadas de cátions que dispõem-se ao redor das partículas de argila, em um meio líquido, originam forças repulsivas eletrostáticas quando as partículas buscam aproximar-se. Essas forças dependem da distância entre as partículas, podendo prevalecer tanto uma, quanto a outra. Quando há a prevalência de forças atrativas, o solo tenderá a floculação, enquanto que no predomínio de força repulsivas, favorece manter o estado disperso (LAMBE, 1958).

Os principais aditivos empregados na estabilização química dos solos são o cimento Portland e a cal. Esses materiais quando misturados ao solo podem conferir aumento da resistência, melhora na trabalhabilidade e redução na variação volumétrica (LIMA; 1981). Além da cal e do cimento, existem outros estabilizantes químicos, por exemplo, sulfatos, álcalis, hidróxido de cálcio, carbonato de sódio, silicato de sódio, cloreto de cálcio, hidróxido de cálcio (CASTRO, 2015). Esses estabilizantes alternativos, uma vez empregados no solo, atuam segundo mecanismos próprios. Os produtos silicato de sódio (Na_2SiO_3), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) são álcalis usualmente associadas ao emprego do cimento e da cal, com a finalidade de estabilizar solos (FERREIRA; FREIRE, 2003). O silicato de sódio reage com os sais solúveis de cálcio em soluções aquosas, formando silicatos de cálcio gelatinosos insolúveis. Os silicatos de cálcio são agentes de cimentação que melhoram a estabilidade, preenchendo os vazios e expulsando, conseqüentemente, a água do solo (REN; KAGI, 1995).

3. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em Viçosa, município localizado na Zona da Mata mineira, com coordenadas geográficas $20^{\circ}45'14''S$ e $42^{\circ}52'54''W$ e distante a 230 km da capital deste estado, Belo Horizonte, e o método adotado em sua elaboração foi o método indutivo experimental. A metodologia utilizada divide-se em três etapas: etapa preparatória, etapa de coleta de dados e etapa de tratamento dos dados coletados, como pode ser observado no fluxograma da FIGURA 7.

FIGURA 7 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

3.1. Etapa preparatória

3.1.1. Preparação das amostras de solo

O solo selecionado foi coletado de um talude (1), também do município de Viçosa, situado no interior do *campus* da UFV à margem de uma estrada não pavimentada que liga a Escola Estadual Effie Rolfs (2) e o setor de Equideocultura (3) da instituição, conforme a FIGURA 8.

FIGURA 8 – Localização do ponto de coleta de solo



Fonte: adaptado de GOOGLE MAPS, 2021.

O solo foi coletado e transportado em sacos para o Laboratório de Engenharia Civil (4), onde procedeu-se ao preparo da amostra antes de iniciar os estudos. Após uma semana de secagem à sombra, o solo foi peneirado na peneira # nº 4, com abertura de 4,8 mm, conforme a FIGURA 9.

FIGURA 9 – Peneiramento do solo na peneira com abertura de 4,8 mm



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 10 – Destorroamento do solo com os pés sobre bandeja metálica



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Como pode ser observado na FIGURA 10, os torrões de solo retidos foram destorroados

com os pés dentro de um recipiente rígido e, o material novamente peneirado até que esse passasse completamente pela malha da peneira.

Na NBR 6457 (ABNT, 2016a) é recomendado que o destorroamento do material no preparo de amostras de solo seja realizado em almofariz de porcelana com o auxílio de pistilo recoberto com borracha. Contudo, ter realizado o destorroamento conforme o procedimento da dessa norma demandaria muito mais tempo, além de ser, também, mais laborioso, devido a quantidade de material selecionado.

Após todo o solo ter sido destorroado e peneirado na peneira com abertura de 4,8 mm, este foi depositado sobre uma lona, na qual foi realizada a homogeneização do material, conforme pode ser observado na FIGURA 11.

Finalmente, depois de realizada a homogeneização, o solo foi acondicionado em tambores revestidos com sacos e em bombonas plásticas, armazenados em local protegido contra chuvas, como apresentado na FIGURA 12. As aberturas foram devidamente lacradas com plástico, a fim de evitar contaminação do material, e recobertas com tábuas, impedindo, portanto, que houvesse o rompimento desses plásticos. Ainda, os tambores e as bombonas foram dispostos sobre estrados de madeira, com o propósito de evitar o contato direto com o chão.

FIGURA 11 – Preparo do solo sobre a lona para realizar a homogeneização



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 12 – Acondicionamento e armazenamento do solo tambores e bombonas identificados



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Após a secagem, preparo da amostra, acondicionamento e armazenamento do solo, iniciou-se a caracterização dos materiais e dosagem das misturas. Foram realizados, portanto, na etapa preparatória as seguintes análises:

- i. determinação do teor de umidade das misturas com adição do licor negro kraft;
- ii. determinação da massa específica dos sólidos, conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016b);
- iii. análise granulométrica, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016e);

- iv. determinação dos limites de plasticidade e de liquidez, de acordo com a NBR 7180 (ANBT, 2016d) e a NBR 6459 (ABNT, 2016c); e
- v. ensaios de compactação, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016f).

3.1.2. Determinação do teor de umidade das misturas com adição do licor negro kraft

O licor negro kraft que foi utilizado no estudo era proveniente da madeira de pinus, oriundo do Laboratório de Celulose e Papel (LCP), pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

Foi cedido um galão de 20 litros com o licor, o qual foi homogeneizado e repartido em 14 recipientes menores, com capacidade de 1,5 litros, feitos de vidro e com tampa, armazenados em câmara úmida. Essa divisão e substituição de embalagem foram realizadas a fim de facilitar o manuseio e utilização do licor durante a preparação das misturas e evitar alteração de sua composição e propriedades. Uma amostra licor negro kraft utilizado é apresentado na FIGURA 13.

FIGURA 13 – Licor negro kraft utilizado



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Para determinar o quanto o licor negro contribui com o acréscimo no teor de umidade das misturas, adicionou-se, e homogeneizou vigorosamente, cerca de 8 a 10% de licor negro em relação à massa seca de solo. Nessa determinação, utilizou-se dosagem superior aos tratamentos do estudo, pois a quantidade de licor adicionada deveria ser suficiente para homogeneizar-se com o solo sem necessidade de adição de água, e ao mesmo tempo não o impregnasse. Em seguida, foram coletadas seis amostras da mistura em cápsulas e levadas aos trios às estufas, a temperaturas de 65°C e 105°C.

Visto que o licor negro apresenta sólidos orgânicos, optou-se por levar o material a 65°C para que não houvesse queima destes sólidos, de maneira análoga que na NBR 6457 (ABNT, 2016a) recomenda-se que se faça para solos orgânicos. Contudo, o processo de determinação

de umidade a 65°C é demorado, podendo demandar de 7 a 10 dias para que a massa do material atinja valor constante. Por essa razão foi determinado o teor de umidade da mistura a 105°C, a fim de estabelecer uma correlação entre os dois teores de umidade e massa de sólidos do licor que é queimada durante a determinação do teor de umidade a 105°C. Essa correlação é possível a partir da solução do seguinte sistema das EQUAÇÕES 1 e 2:

$$w_{65^{\circ}\text{C}} = \frac{M_{H_2O} + M_{liq}}{M_{solod} + M_{sol}} \quad (1)$$

$$w_{105^{\circ}\text{C}} = \frac{M_{H_2O} + M_{liq} + M_{sol}}{M_{solod}} \quad (2)$$

Onde:

$w_{65^{\circ}\text{C}}$ é o teor de umidade determinado a 65°C;

$w_{105^{\circ}\text{C}}$ é o teor de umidade determinado a 105°C;

M_{H_2O} é a massa de água solo equivalente ao teor de umidade higroscópico;

M_{liq} é a massa líquida do licor que evapora no processo de secagem a 65 e 105°C;

M_{sol} é a massa de sólidos orgânicos do licor; e

M_{solod} é a massa de solo seco.

Uma vez que o teor de umidade é determinado a 65°C, a massa de sólidos orgânicos integra a massa seca da amostra, somando-se à massa seca de solo. Contudo, a massa de sólidos orgânicos é perdida quando levada a 105°C, deixando de integrar a massa seca e sendo perdida junto com a massa de água e massa de água do solo e do licor.

3.1.3. Preparação das misturas de solo-licor e solo-licor-cimento

Foram preparadas duas misturas com teores de 3 e 5% de licor negro kraft, um vez que um estudo realizado previamente com dosagens 1 a 5%, com incrementos de 1%, verificou uma aumento máximo de massa específica seca quando adicionados 3% de licor e uma redução do coeficiente de permeabilidade na ordem de 10 vezes quando adicionados 5% de licor ao solo (QUEIROZ, 2018). Outras quatro misturas também foram produzidas utilizando os mesmos teores de licor negro kraft e 2% de cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32.

Os percentuais de licor negro kraft, cimentos e as quantidades de água, a fim de atingir os teores de umidade desejados, foram determinados em relação à massa seca de solo. Vale

ressaltar que a contribuição do licor para a contribuição do teor de umidade da mistura foi levado em consideração no cálculo das quantidades de água.

Para realização dos ensaios de compactação e moldagem dos corpos de prova, esperou-se o período de 18 a 24 horas após a homogeneização, inicialmente, da mistura solo-licor, seguido da adição de água, a fim de promover a ocorrência das reações de troca catiônica entre o solo e o licor.

Nas misturas em que foram adicionados os cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32, o preparo foi semelhante, adicionando o cimento após o período de 18 a 24 horas e esperando adicionalmente uma hora, para aguardar o tempo de início de pega do cimento. Após o início do tempo de pega, o tempo gasto nos ensaios de compactação e na moldagem de corpos de prova não excedeu uma hora e meia, a fim de padronizar todos os ensaios de compactação e os lotes de corpos de prova e respeitar o tempo de fim de pega dos cimentos.

3.2. Etapa de Coleta de dados

3.2.1. Moldagem de corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de permeabilidade e compressão simples foram moldados seguindo a umidade ótima ($w_{ót}$) e o peso específico seco máximo ($\rho_{dmáx}$) obtido nos ensaios de compactação de uma das misturas dosadas. Foram estabelecidos intervalos de compactação, os quais buscou-se respeitar ao longo do estudo, sendo a umidade de compactação superior a $w_{ót} - 1\%$ e inferior a $w_{ót} + 2\%$ e o grau de compactação superior a 95%.

Cada corpo de prova, à medida que era compactado, foi protegido por filme de PVC ou sacos plásticos selados e levados à câmara úmida para cura posterior de 7 ou 28 dias. No total, foram moldados 99 corpos de prova para os ensaios de permeabilidade e compressão simples, distribuídos conforme a TABELA 6:

TABELA 6 – Distribuição dos corpos de prova moldados

Ensaio	Misturas							Total
	Ref. (solo natural)	3% LN	3% LN e CP II-E-32	3% LN e CP II-F-32	5% LN	5% LN e CP II-E-32	5% LN e CP II-F-32	
Permeabilidade	3	3	3	3	3	3	3	21
Comp.simples	15	12	7	12	13	7	12	78

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

3.2.2. Ensaios de permeabilidade

A condutividade hidráulica dos solos está intrinsecamente ligada à sua granulometria,

ao seu índice de vazios, à sua estrutura, à sua mineralogia, ao seu grau de saturação e ao fluido percolante. Quando determinado o coeficiente de permeabilidade em laboratório é necessário atentar-se à temperatura de ensaio, uma vez que a massa específica e viscosidade do fluido são parâmetros dependentes da temperatura (RIBEIRO, 2002).

Durante o estudo das propriedades hidráulicas das misturas, fez-se uso do equipamento de percolação em coluna desenvolvido por Caneschi (2012), o qual teve seus fundamentos alicerçados nos sistemas convencionais de percolação empregados nos ensaios de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica recomendados pela NBR 13292 (ABNT, 1995b) e pela NBR 14545 (ABNT, 2000).

Caneschi (2012) considerou, além disso, aspectos gerais de funcionamento do sistema desenvolvido no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP por Leite, Paraguassú e Zuquette (1998), o qual também foi utilizado por Pacheco e Silva (2005).

Com relação ao gradiente hidráulico, Caneschi (2012) aplicou ao sistema uma pressão de 100 kPa, que resultou em um gradiente hidráulico de 87 e destacou que esse valor se enquadrava no limite superior da faixa de pressões representativas de barreiras selantes de aterros sanitários, atribuindo a informação a Pacheco e Silva (2005).

Caneschi (2012) destacou ainda que diferentes gradientes hidráulicos podem ser utilizados com justificativas distintas, exemplificando com os gradientes adotados por outros autores. Segundo o autor, Boff (1999), Leite (2001), Basso (2003) e Pacheco e Silva (2005) trabalharam com pressão de 76 kPa, equivalendo um gradiente hidráulico de 68, e justificando esse número por ser uma pressão representativa de barreiras selantes de aterros sanitários, entre 50 e 100 kPa.

Caneschi (2012) também apresenta os gradientes adotados por Yong (2001) e Alves (2005), que utilizaram, em seus estudos, gradientes hidráulicos em torno de 55 e 24, respectivamente, e com justificativa de redução do tempo do ensaio de lixiviação por meio de coluna de solo, pelo primeiro, e segundo tomando como base as recomendações da ASTM D 4874 (1995).

Basso (2003), em seus estudos, considera e tem como base o trabalho de Leite (2000), adotando aspectos como misturas e execução de ensaios, e utilizando o mesmo sistema de percolação projetado e construído por Leite et al (1998) e posteriormente utilizado por Boff (1999) e outros pesquisadores. Basso (2003) realizou algumas modificações no sistema de percolação original e trabalhou com pressão no sistema de 76 kPa, correspondendo o gradiente de 52, sendo

a mesma utilizada por Boff (1999) e Leite (2000). Esta carga hidráulica foi justificada por situar-se no intervalo de 50 a 100 kPa, e atribuída a Peirce et al. (1986)¹, a partir de uma citação de Leite (2000), como sendo comum nas barreiras selantes em aterros sanitários.

Leite (2000), adotou a pressão de 76 kPa como pressão de trabalho, justificando situar-se no intervalo de 50 a 100 kPa, e de fato atribuiu esse intervalo a Peirce et al. (1986) como sendo comum para a grande maioria dos *liners* em aterros sanitários. Contudo, Peirce, Sallfors e Murray (1986), estudaram as pressões de sobrecarga geradas por diversos tipos de aterros sobre liners, dentre eles, aterros sanitários.

Peirce, Sallfors e Murray (1986) analisaram dados de peso específico dos resíduos, profundidades de resíduo e áreas de 16 aterros dos Estados Unidos e (i) relataram que os aterros sanitários apresentavam pressões de sobrecarga que geralmente eram menores que os locais de resíduos perigosos; (ii) que os valores documentados variaram de 450 lb/sq ft (22 kPa) a 2400 lb/sq ft (115 kPa); (iii) valores mais altos foram relatados por outros autores; (iv) que embora os valores de peso específico para o resíduo compactado tivessem variado de local para local, esses valores pareciam ser mais consistente que os valores de peso específico observados em aterros de resíduos perigosos.

O valor de pressão hidráulica de 76 kPa adotado por Boff (1999), Leite (2000), Basso (2003) e Pacheco e Silva (2005), baseando no intervalo apresentado por Peirce, Sallfors e Murray (1986) é mal fundamentado, uma vez que esse intervalo é referente à pressões de carregamento ao invés de pressões hidráulicas. Segundo Leite (2000), após dias de uso ininterrupto, foram observadas variações de vazão provocadas pelo aumento de elasticidade e entupimento das mangueiras, considerando que em ensaios com múltiplas colunas, estas variações requereiam ajustes diferentes de velocidade de fluxo para cada coluna.

O entupimento de mangueiras relatado por Leite (2000) evidencia um processo de erosão no interior dos corpos de prova, ocorrido, provavelmente, devido a força de percolação gerada pela pressão aplicada de 76 kPa. O carregamento de partículas indica que as forças de arraste promovidas pelo fluxo de água são maiores que as forças de resistência favoráveis à permanência da partícula no meio em que se encontra, refletindo também uma condição geométrica os vazios existentes na estrutura do solo são grandes suficientes para que as partículas sejam carregadas (FELL et al., 2008).

¹ Leite (2000) e Basso (2003) citam Peirce, Sallfors e Murray (1986) como Peirce et al. (1986)

De acordo com ASTM (2020), gradientes hidráulicos maiores são normalmente utilizados em laboratório para acelerar os ensaios, mas gradientes excessivos devem ser evitados uma vez que altas pressões de percolação podem consolidar o material, assim como lavar o material da amostra ou carrear partículas finas a jusante e obstruir a extremidade efluente da amostra ensaiada. Na ASTM (2020) são sugeridos alguns valores de gradientes em função da condutividade hidráulica do material, apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – Gradiente máximo recomendado em função de condutividade hidráulica do material

Condutividade hidráulica (m/s)	Máximo gradiente hidráulico recomendado
1×10^{-5} a 1×10^{-6}	2
1×10^{-6} a 1×10^{-7}	5
1×10^{-7} a 1×10^{-8}	10
1×10^{-8} a 1×10^{-9}	20
Menor que 1×10^{-9}	30

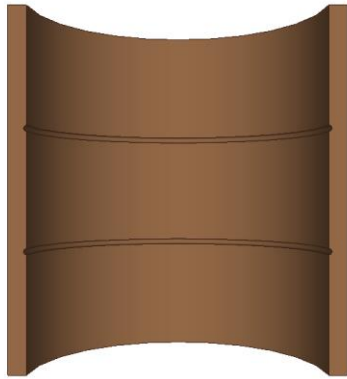
Fonte: ASTM, 2020.

A fim de evitar que ocorresse entupimento de mangueiras semelhante ao relatado por Leite (2000) e o adensamento do material, optou-se trabalhar com gradiente inferior, mesmo que o tempo de duração dos ensaios de percolação em coluna de solo fosse maior. Visto que durante os estudos de Queiroz (2018) foram obtidos valores de permeabilidade na faixa de 10^{-9} a 10^{-11} m/s para as misturas com teores de 1 a 5% licor de negro, optou-se por trabalhar com gradiente de 15, atendendo com maior segurança com as misturas com maior permeabilidade e correspondendo a valor intermediário entre o máximo recomendado para condutividade hidráulica entre 10^{-7} a 10^{-8} e 10^{-8} a 10^{-9} m/s.

Foi proposto executar os ensaios de permeabilidade com três repetições para as seis misturas propostas e o solo natural para referência, portanto, 21 corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados nos parâmetros ótimos das curvas de compactação, com energia estática, em moldes de PVC rígido e submetidos, em sequência, à cura de 7 dias em câmara úmida.

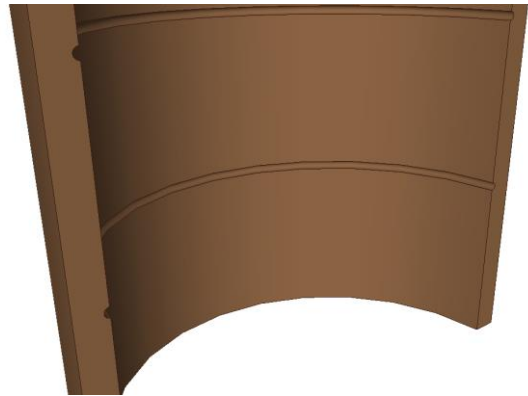
Os moldes utilizados eram de 10 cm de diâmetro interno, 12 cm de altura e 6 mm de espessura, contendo em seu interior, duas ranhuras, posicionadas transversalmente a quatro centímetros das bordas, que inicialmente preenchidas com bentonita, exerciam função de barreira contra o fluxo preferencial ascendente no contato entre o PVC e o corpo de prova uma vez que estivesse saturada. São apresentados nas FIGURAS 14 e 15, respectivamente, um corte esquemático de um dos moldes utilizados e o detalhe de uma das ranhuras, elaborados no *software* SketchUp.

FIGURA 14 – Esquematização: corte do molde



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA 15 – Esquematização: detalhe da ranhura transversal



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Ao final dos 7 dias de cura, os corpos de prova emoldados foram acoplados a uma base e uma tampa de Nylon 6 (PA6), e aparafusados, sendo a superfície de contato entre o solo e esses elementos separados por papel filtro. Tanto a base quando a tampa possuem um sistema radial de ranhuras, interligado por um sistema concêntricas de ranhuras de formato circular, conforme a FIGURA 16. Esses sistemas de ranhuras têm o objetivo de receber e distribuir uniformemente o fluido percolante sobre a base do corpo de prova, e coletá-lo em seu topo após a percolação.

A base possui lateralmente um ponto de entrada para o fluido percolante (A), que se comunica ao seu centro (B) da face interna, como pode ser observado na FIGURA 17, enquanto que a tampa possui um ponto de saída em seu centro (C) e um purgador para saída de ar (D), que podem ser observados nas FIGURAS 16 e 17. Além disso, a parte externa da tampa possui um suporte que permite conectar tubos de coleta de percolado de três diâmetros (i, ii, iii).

FIGURA 16 – Esquematização: sistemas radial e concêntrico de ranhuras na base



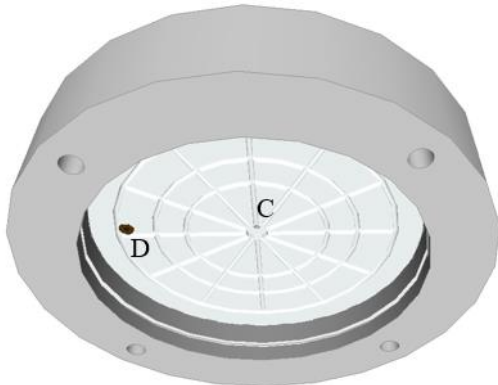
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA 17 – Esquematização: ponto de entrada e saída de fluido percolante na base



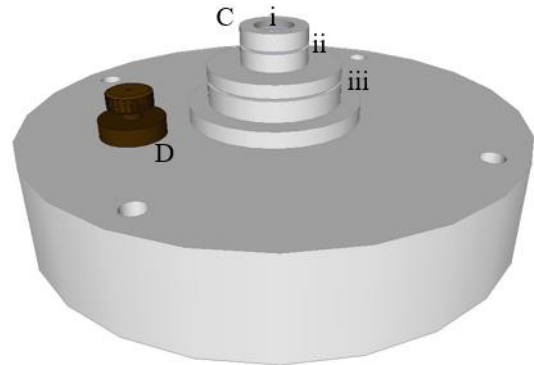
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA 18 – Esquematização: ponto de saída de fluido percolante e purgador na tampa – vista inferior



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA 19 – Esquematização: ponto de saída de fluido percolante, purgador e base suporte para tubos de coleta na tampa – vista superior



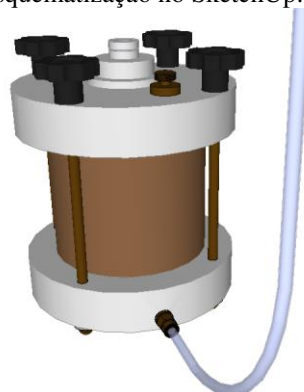
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Após a união dos corpos de provas moldados nos tubos de PVC com as tampas e bases, na configuração de permeômetros, a saturação dos corpos de prova foi realizada conectando-os às células de interface cheias de água destilada. Durante fase de saturação, os purgadores foram mantidos a maior parte do tempo fechados, sendo abertos regularmente por breve intervalo de tempo a fim de expulsar o ar contido no interior de seus vazios, e ao mesmo tempo não permitir perda de percolado. Ao final da saturação, os purgadores permaneceram fechados durante todo o tempo.

A vedação entre os elementos do permeômetro foi garantida por meio de anéis de Oring, colocados em seus entalhes laterais, que podem ser observados nas FIGURAS 16 a 18, e por anéis de raios interno e externo coincidentes com os moldes de PVC, confeccionados com câmara de ar.

Na FIGURA 20 é representada uma esquematização do permeômetro conectado à mangueira de entrada de fluido pela base, montado com todos suas partes constituintes: corpo de prova moldado no tubo de PVC, base, tampa, hastes com rosca, ruelas e porcas.

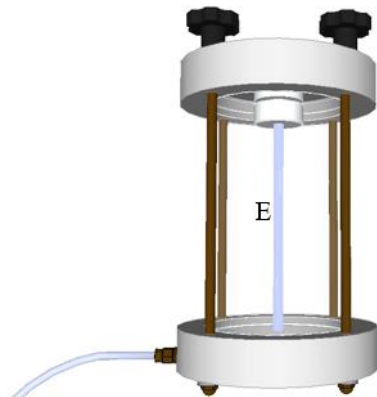
FIGURA 20 – Esquematização no SketchUp: permeômetro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

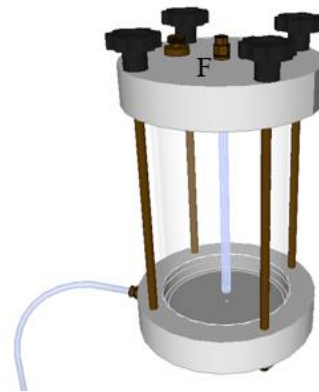
As células de interface possuem um formato similar aos permeâmetros, mas apresentam aspectos construtivos mais simplificados, sendo constituídas por uma câmara cilíndrica produzido em material acrílico transparente, tampadas inferiormente e superiormente, e um tubo capilar (E), como apresentado na FIGURA 21. A base e a tampa das células de interface são do mesmo material que as do permeâmetro, porém não possuem sistemas radial e concêntrico circular de ranhuras. Além disso, ao invés de possuir um suporte para adaptar tubos coletores, as tampas das células de interface apresentam um conector pneumático de engate rápido para conectar mangueiras (F) para entrada de ar comprimido, apresentado na FIGURA 22.

FIGURA 21 – Esquemática no SketchUp: célula de interface – vista inferior



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA 22 – Esquemática no SketchUp: célula de interface – vista superior



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Após o período de saturação, as células de interface foram conectadas aos painéis intercomunicados à rede de ar comprimido do laboratório, apresentados na FIGURA 23. Os painéis apresentam um registro de esfera (G) que desconecta o equipamento de percolação da rede de ar comprimido, um regulador de pressão (H) Norgren 11-018-110 que regula a entrada de ar comprimido para o sistema, um manômetro (I) e três pontos de saída (J) do tipo acoplador “fêmea” com válvula de retenção e engate pneumático do tipo pino “macho” sem válvula de retenção.

Para a execução dos ensaios de percolação em coluna, conectou-se uma das saídas do painel a um manômetro de mercúrio, a fim de monitorar com maior precisão a pressão de ar comprimido empregado no ensaio e verificar possíveis oscilações ocasionadas por queda ou elevação de pressão na rede do laboratório. Inicialmente, o registro de esfera foi aberto e o regulador ajustado até o manômetro de mercúrio estabilizar em uma pressão 13,4 cmHg (17,86 kPa), correspondendo a um gradiente hidráulico de 15,2, valor mais próximo de 15 que foi possível ajustar.

Somente após a pressão ter sido ajustada, que as células de interface foram conectadas aos painéis para serem pressurizadas. Na saída das tampas dos permeômetros foram conectados tubos de vidro, além de tê-los protegido com papel alumínio a fim de evitar a evaporação do percolado, como pode ser observado na FIGURA 24. Durante o ensaio, sob temperatura controlada, o percolado teve a temperatura aferida, foi coletado, pesado, armazenado em potes de 30 ou 50 mL e refrigerados, além de registrar o tempo transcorrido entre as coletas.

FIGURA 23 – Vista frontal dos painéis intercomunicantes à rede principal de ar comprimido



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 24 – Permeômetros com tubos para coleta do percolado protegidos com papel alumínio



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Buscou-se manter o sistema, apresentado na FIGURA 25, funcionando ininterruptamente, sendo interrompida a entrada de ar comprimido nas células de interface na necessidade de reabastecê-las com água destilada. No decorrer do reabastecimento, as células de interface eram desconectas e reabastecidas uma a uma, e foi considerado o tempo transcorrido em que as células ficaram sem alimentação de ar comprimido para descontar do tempo entre as coletas. O reabastecimento fez-se necessário sempre que o nível de água no interior das células de interface atingissem 7,5 cm abaixo da capacidade máxima, marcados com 3 pedaços de fita adesiva justapostos, que podem ser observados na FIGURA 25. Tal prática foi adotada com a finalidade de evitar a discrepância entre o nível das células, mantendo-os sempre próximos, e reduzir o tempo transcorrido de reabastecimento.

No término do ensaio, as amostras coletadas e armazenada nos potinhos, bem como, amostras da água destilada e do licor negro kraft empregados foram encaminhadas para determinação de Na, K, Ca, Mg, S, Fe, Al, Si por espectroscopia de absorção atômica. Além disso, os corpos de prova também foram utilizados para a realização dos ensaios de adensamento CRS.

FIGURA 25 – Vista frontal do sistema de percolação em coluna implementado por Caneschi (2012) em uso, com a realização simultânea de 21 permeâmetros e sete células de interface



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

3.2.3. Ensaio de compressão simples

Os corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão simples foram moldados nos parâmetros ótimos das curvas de compactação, com energia estática, em cilindro Proctor e submetidos, em sequência, à cura de 7 e 28 dias em câmara úmida. A fim de estabelecer a padronização e maior controle de compactação dos corpos de prova, a quantidade de misturas preparada era suficiente para moldar até 8 corpos de prova, repartidos em dois lotes de 3 ou 4 corpos de prova. A inclusão de um quarto corpo de prova nos lotes foi realizada quando, no processo de moldagem, algum dos três primeiros corpos de prova apresentava alguma desuniformidade com os demais.

A fim de respeitar o tempo de trabalhabilidade adotado de uma hora e meia com as misturas de cimento, os lotes tiveram de ser moldados separadamente. O preparo preliminar da mistura de solo-licor-água foi realizado com a quantidade total para moldar 8 corpos de prova, sendo repartido em duas partes antes do cimento ser adicionado. Enquanto era realizada a moldagem do primeiro lote de corpos de prova, a segunda metade do material recebia a adição de cimento e era reservada, para aguardar o tempo de início de pega do cimento.

Na FIGURA 26 são apresentados cinco lotes de corpos de prova recém moldados, embalados com filme de PVC e identificados. Foi definido que o primeiro lote sempre fosse ensaiado com 7 dias de cura e o segundo com 28 dias, e durante esse período, os corpos de prova permaneceram armazenados na câmara úmida, como pode ser observado na FIGURA 27.

FIGURA 26 – Corpos de prova dos ensaios de compressão simples recém moldados, embalados com filme PVC e identificados



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 27 – Corpos de prova dos ensaios de compressão simples armazenados na câmara úmida aguardando os tempos de cura



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Para definir a velocidade de ensaio, realizaram-se testes com velocidades de 1%/min, 1,25%/min e 1,5%/min com três corpos de prova compactados sem aditivos e submetidos à cura de 7 dias. Estas velocidades foram definidas seguindo a NBR 12770 (ABNT, 1992), que recomenda que o carregamento seja aplicado de modo a se obter uma velocidade de deformação específica constante, cujo valor deva estar compreendido entre 0,5%/min e 2%/min. Após os testes, observou-se que o corpo de prova rompido à velocidade de 1%/min foi o que apresentou maior resistência à compressão simples, e em razão disso, adotada nos ensaios de compressão simples de todas misturas.

Antes de serem ensaiados, as dimensões dos corpos de prova foram aferidas, três determinações de altura afastadas de 120°, quatro determinações de diâmetro nas quartas partes do corpo de prova, duas próximas ao topo e duas à base afastadas de 90°, atendendo as determinações mínimas da NBR 12770 (ABNT, 1992). O rompimento foi realizado em uma prensa modelo *Tritech*, com capacidade de 100 kN, da *Wykeham Farrance International*, equipada com um anel dinamométrico com capacidade de 1000 kgf, como pode ser observado na FIGURA 28. Os rompimentos foram filmados por uma webcam e computador, sendo capturadas as leituras do anel dinamométrico e o deslocamento da prensa indicado pelo relógio comparador. Posteriormente os vídeos foram analisados para realizar a tabulação dos dados.

À medida que transcorriam os ensaios, os corpos de prova rompidos eram novamente identificados e armazenados em sacos plásticos para que não houvesse variação significativa no teor de umidade na ruptura. Ao final, foi realizada a documentação fotográfica dos lotes rompidos, como pode ser observado na FIGURA 29, e a determinação do teor de umidade na ruptura de cada corpo de prova.

FIGURA 28 – Rompimento do quarto corpo de prova do segundo lote referência (R - D) com cura de 28 dias



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 29 – Segundo lote de corpos de prova referência rompidos (R - D, E, F e H)



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Durante o preparo de algumas misturas, a quantidade de água adicionada foi maior que a necessária para atingir o teor de umidade ótimo, e assim ultrapassou o limite estabelecido. Por essa razão, foi necessário realizar o preparo de novos lotes, justificando a quantidade maior de corpos de prova apresentados na TABELA 6 de determinadas misturas. Os lotes com teor de umidade fora do intervalo estabelecido não foram descartados, sendo rompidos normalmente após as curas de 7 e 28 dias, o que permitiu avaliar o efeito do teor de umidade mais elevado na resistência e deformação específica destas misturas.

3.2.4. Ensaio de adensamento CRS

No estudo das propriedades mecânicas das misturas, optou-se por realizar o ensaio de adensamento com taxa de deformação constante (CRS: *Constant Rate of Strain*) ao invés do ensaio de adensamento incremental por se tratar de um método mais rápido de determinar os parâmetros de adensamento das misturas, adequando-se satisfatoriamente à necessidade de avaliar o comportamento das misturas sem que os compostos do licor negro kraft e do cimento causassem abrasão à célula de adensamento devido o tempo de exposição. Outro fator que contribuiu para a escolha do ensaio de adensamento CRS foi a possibilidade de determinar os parâmetro de compressibilidade e permeabilidade do solo, desde que fosse garantido um grau de saturação suficiente para a ocorrência de acréscimo de poropressão na base do corpo de prova durante a execução do ensaio a dada velocidade.

O ensaio de adensamento CRS consiste basicamente em fixar uma das faces do corpo de prova enquanto na outra é imposto um deslocamento com velocidade constante, implicando em um carregamento constante com o tempo (LIMA, 1996). Durante a realização dos ensaios de adensamento CRS, os corpos de prova dos ensaios de permeabilidade foram reaproveitados,

uma vez que acreditou-se, antecipadamente, que o tempo que os corpos de prova ficaram submetidos à contrapressão 17,86 kPa garantiu um grau de saturação suficiente para a ocorrência

A talhagem dos corpos de prova do ensaio de adensamento foi realizada sobre os corpos de prova da permeabilidade parcialmente desmoldados, a fim de resguardar a integridade do restante do material emoldado. Ao realizar o desmolde parcial do corpos de prova, foi observada a tendência de componentes do licor acumular-se nas faces, principalmente basal e apical, dos corpos de prova com 3 e 5% de licor negro, conferindo-lhes aspecto enegrecido, apresentado na FIGURA 30. Procedeu-se à talhagem utilizando o próprio anel da célula de ensaio, com 6,347 cm de diâmetro e 2,668 cm de altura, e a fim de evitar que as pedras porosas, mangueiras e as demais partes constituintes célula de adensamento CRS se impregnassem com os componentes acumulados do licor, eliminaram-se as regiões basal/apical, como pode ser observado na FIGURA 31.

FIGURA 30 – Topo de corpo de prova com 3% de licor negro kraft (3% – A) parcialmente desmoldado e acúmulo de componentes do licor em suas faces



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 31 – Parte impregnada por componentes do licor sendo eliminada durante talhagem de corpo de prova (3% - C) para ensaio de adensamento CRS



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

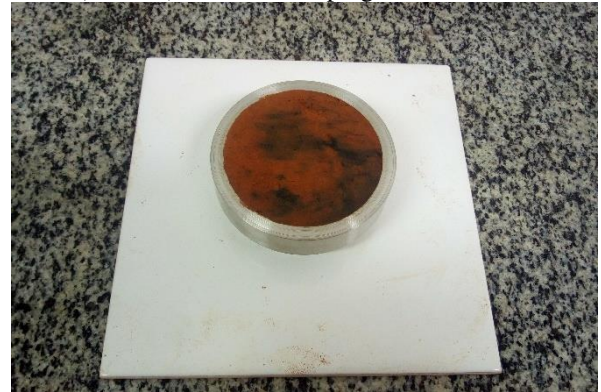
Mesmo removendo a maior parte impregnada de componentes do licor, os corpos de prova no anel continuaram apresentando pequenas regiões enegrecidas, que eram menores à medida que o anel era gravado. A partir das FIGURAS 32 e 33 é possível observar a essa redução na quantidade de material impregnado no corpo de prova, comparando o topo e a base do anel.

FIGURA 32 – Topo do anel com corpo de prova talhado (3% – A): face menos impregnada



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 33 – Topo do anel com corpo de prova talhado (3% – A): face mais impregnada



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

A célula de adensamento CRS utilizada constitui-se basicamente de uma base, sobre a qual é acoplada uma câmara de pressão e uma tampa, confeccionados em aço inox. A base da célula possui um sistema de ranhuras similar à base do equipamento de percolação em coluna e ponto de saída (A) que se comunica com um registro de esfera (B) e com um conector pneumático de engate rápido (C), como pode ser observado na FIGURA 34. Na montagem da célula, inicialmente, a base é enchida com água destilada e uma pedra porosa com papel filme é apoiada sobre o sistema de ranhuras, conforme a FIGURA 35, enquanto que o anel com o corpo de prova talhado é encaixado à câmara de pressão com a parte biselada do anel voltada para cima.

FIGURA 34 – Base da célula de adensamento CRS, evidenciando ponto de saída (A), registro (B) e conector (C)



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 35 – Base da célula de adensamento CRS preenchida com água destilada e com a papel filtro e pedra porosa encaixados



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Em seguida, a câmara é acoplada à base, e recebe em seu interior uma segunda pedra porosa com papel filtro, o cabeçote (*top cap*) de distribuição de cargas e um colar guia encaixado sobre a borda biselada do anel. O colar impede que a pedra porosa e o cabeçote fiquem descentralizados em relação ao corpo de prova, garantindo que apenas o corpo de prova receba os carregamentos e impedindo, portanto, qualquer possibilidade de compressão do anel durante

a execução do ensaio. Nas FIGURAS 36 e 37 é apresentada a configuração da câmara de pressão acoplada à base sem e com a segunda pedra porosa e colar guia.

FIGURA 36 – Câmara de pressão com corpos de prova inseridos sobre a base da célula



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 37 – Colar guia apoiado sobre borda biselada do anel e pedra porosa sobre corpo de prova

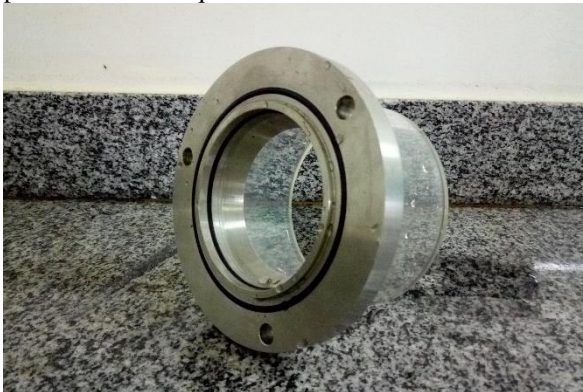


Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Antes da célula ser tampada, a câmara de pressão é enchida com água destilada e finalmente lacrada por três porcas presas às hastes com rosca. O que impede eventuais vazamentos entre os componentes da célula é o sistema de vedação composto por O-rings localizados nas faces que entram em contato, como pode ser observado na FIGURA 38.

A tampa possui um pistão responsável por transmitir o carregamento axial ao corpo de prova, repousando sobre o cabeçote, e dois conectores pneumáticos de engate rápido. O primeiro conector (D), que se encontra na parte posterior da célula apresentada na FIGURA 39, é responsável pela comunicação da câmara de pressão à base da célula a partir do registro. O segundo conector (E) é responsável pela comunicação da câmara de pressão aos painéis triaxiais, via potes de mercúrio.

FIGURA 38 – O-rings na parte inferior da câmara de pressão e na face que entra em contato com o anel



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 39 – Célula de adensamento CRS montada, evidenciando conectores pneumáticos (D e E)



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Antes de iniciar a fase de carregamento, a base e o topo do corpo de prova foram submetidos à uma contrapressão de 200 kPa aplicada no interior da câmara de pressão a partir do segundo conector pneumático (E) e mantendo o registro comunicante (B) aberto. Após a estabilização das pressões no interior da célula com o corpo de prova, a comunicação do topo com a base do corpo de prova foi cortada, fechando-se o registro comunicante, e foi feito o acionamento da prensa. Os ensaios de adensamento CRS foram filmados por webcam e computador, da mesma forma que os de compressão simples, sendo capturadas as leituras do anel dinâmico, o deslocamento da prensa indicado pelo relógio comparador, a pressão de câmara e a poropressão na base do corpo de prova indicadas nos transdutores de pressão. Posteriormente os vídeos foram analisados para realizar a tabulação dos dados.

Para definir a velocidade de ensaio, realizou-se um teste de velocidades com corpos de prova talhados a partir do topo de alguns corpos de prova da permeabilidade, como o apresentado na FIGURA 30, em que o topo de um dos corpos de prova com 3% de licor negro (3% - A) foi parcialmente extraído para ser feita a talhagem do corpo de prova teste. As bases dos corpos de prova da permeabilidade foram priorizadas para a talhagem dos corpos de prova do adensamento assim que a velocidade de ensaio fosse definida.

Os testes de velocidade começaram com deslocamento de 0,05 mm/min, sendo aumentado gradativamente em 0,05 mm/min a medida que transcorriam os testes e os acréscimos de poropressão não se faziam presentes. Os testes permitiram verificar que a velocidade de 0,10 mm/min era suficiente para que gerasse acréscimos de poropressão na base dos corpos de prova de referência e das misturas de solo-licor, enquanto que para as misturas com solo-licor-cimento era necessário executar o carregamento à velocidade de 0,15 mm/min.

Determinar a velocidade de aplicação do carregamento é um fator importante na execução do ensaio de adensamento CRS, sendo bastante discutida entre diversos autores. Smith e Wahls (1969) chegaram a sugerir que razão entre a poropressão gerada na base do corpo de prova e a tensão vertical (u_b/σ_v) fosse inferior a 50%. Posteriormente, outros autores contradisseram esse limite, recomendando valores mais conservadores, por exemplo, Wissa et al (1971) recomendam valores entre 2 a 5% para a razão u_b/σ_v . Alguns limites sugeridos na literatura para a razão u_b/σ_v encontram-se dispostos na TABELA 8.

A primeira edição da D 4186 (ASTM, 1998) sugeriu que a razão não ultrapassasse 30% e sugeriu valores de velocidades de ensaio baseando-se no limite de liquidez dos solos, como apresentado na TABELA 9.

TABELA 8 – Recomendações para razão u_b/σ_v disponíveis na literatura

Autor	Razão u_b/σ_v
Smith e Wahls (1969)	< 50%
Wissa et al. (1971)	2 a 5%
Gorman et al. (1978)	30 a 50%
Larsson e Sällfors (1986)	< 15%
Sandbraekken et al. (1986)	5 a 10%
Carvalho et al. (1993)	< 30%

Fonte: adaptado de MOURA, 2004.

TABELA 9 – Recomendações da D4186/98 para velocidades de deformação em função do valor de LL

Limite de liquidez LL (%)	Velocidade de deformação (%/min)
< 40	0,04
40 a 60	0,01
60 a 80	0,004
80 a 100	0,001
100 a 120	0,004
120 a 140	0,00001

Fonte: ASTM, 1998.

A penúltima revisão da D 4186 (ASTM, 2012) sugere que a taxa de deformação produza excessos de propressão que mantenham a razão u_b/σ_v entre 3 e 15% na região normalmente adensada durante o carregamento. Durante os testes para determinar a velocidade de ensaio, buscou-se atender esta última recomendação apresentada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de laboratório executados para estudar o efeito da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas compactadas.

4.1. Determinação do teor de umidade das misturas com adição do licor negro kraft

Na análise de quando o licor negro kraft contribui do teor de umidade observou-se que a adição de 50,43 g de licor negro à massa de 663,00 g de solo seco ao ar, elevou o teor médio de umidade do solo de 16,0% para 22,3% (determinação feita a 65°C), implicando que a adição de 8,8% de licor negro em relação à massa seca de solo contribui com o aumento de 6,3% no teor de umidade da mistura. Em termos unitários, tem-se que a adição de 1% do licor contribui com 0,7% no aumento do teor de umidade da mistura.

A determinação do teor de umidade da mistura a 105°C foi de 22,9%, representando uma diferença de 0,6% em relação à determinação a 65°C, devido à queima dos sólidos orgânicos presentes no licor negro. Em termos unitários, a determinação a 105°C resultaria erroneamente que a adição de 1% de licor contribuiria com 0,8% no aumento do teor de umidade da mistura.

Tratando-se de misturas com baixos teores de licor negro, a determinação do teor de umidade a 105°C resultaria em erros relativamente desprezíveis, podendo até ser menor que a diferença entre a média e as três determinações calculadas. Contudo, em misturas com teores mais elevados de licor negro, os erros se tornariam significativos, por exemplo, em misturas com 5% de licor negro, que o erro seria de 0,5%, uma vez que, 5% de licor contribui com 3,5% no teor de umidade da mistura e, em uma determinação a 105°C, o valor seria de 4,0%.

Com os teores de umidade da mistura determinados a 65 e 105°C, apresentadas na TABELAS 10 e 11, e o sistema formado pelas EQUAÇÕES 1 e 2, apresentadas no capítulo anterior, foi possível estabelecer uma correlação que corrigisse as determinações do teor de umidade das misturas a 105°C. A solução do sistema permitiu determinar que dos 50,43 g (8,8%) de licor aplicado, 32,65 g consiste na massa de licor que evapora no processo de secagem a 65 e 105°C (M_{liq}) e que 2,94 g consiste na massa de sólidos orgânicos que volatizam no processo de secagem a 105°C (M_{sol}).

TABELA 10 – Determinação do teor de umidade solo-licor a 65°C

Determinação	1	2	3
Cápsula	R01	R71	R43
Massa bruta úmida (g)	112,63	98,79	107,54
Massa bruta seca (g)	97,38	86,16	93,23
Tara da cápsula (g)	28,54	29,94	28,91
Teor de umidade (%)	22,15	22,47	22,25
Teor médio (%)	22,3		

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA 11 – Determinação do teor de umidade solo-licor a 105°C

Determinação	1	2	3
Cápsula	33	85	X18
Massa bruta úmida (g)	116,96	87,81	86,99
Massa bruta seca (g)	100,41	76,49	74,86
Tara da cápsula (g)	28,18	26,86	22,24
Teor de umidade (%)	22,91	22,81	23,05
Teor médio (%)	22,9		

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Para os 663,00 g de solo seco ao ar utilizado na análise de quando o licor negro kraft contribui do teor de umidade, seriam necessários 17,15 g de licor para que a mistura atingisse 3% de adição e 28,58 g para que atingisse os 5%. Dessa forma, massa de sólidos orgânicos voláteis que comporiam essas quantidades de licor seriam iguais a 1,00 e 1,67 g, respectivamente, para as adições de 3 e 5%, e contribuiriam com 0,2 e 0,3% no total de massa seca das misturas.

4.2. Caracterização química do licor negro kraf

Foram encaminhadas para análise quatro amostras do licor negro e os resultados obtidos da espectroscopia de absorção atômica encontram-se na TABELA 12:

TABELA 12 – Determinação dos elementos analisados em espectroscopia de absorção atômica (mg/L)

Amostra	Na	K	Mg	Ca	Fe	Al	Si
1	3904,0	189,8	2,6	32,7	1,5	194,4	23,5
2	4100,0	195,9	0,5	59,5	3,0	387,2	30,6
3	3996,0	170,3	0,6	64,5	3,0	377,7	30,0
4	4170,0	182,4	0,6	61,3	2,7	369,7	29,5

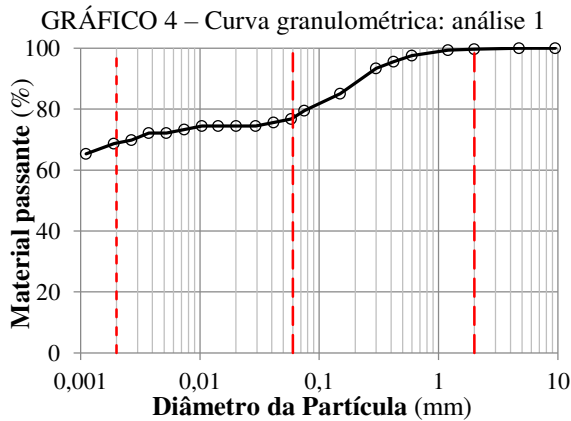
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em virtude da situação da pandemia do covid-19, o funcionamento de laboratórios dentro e fora da UFV foi suspenso, causando-lhes dificuldades em atender as demandas de ensaios, e acarretando em atrasos nos resultados. Nesse sentido, o laboratório responsável pela espectroscopia de absorção atômica das amostras de licor negro e do percolado não conseguiu entregar as análises de S. Outras análises químicas e mineralógicas também estavam previstas de serem realizadas, como, fluorescência e difração de raios-x, mas foram abandonadas pela mesma razão.

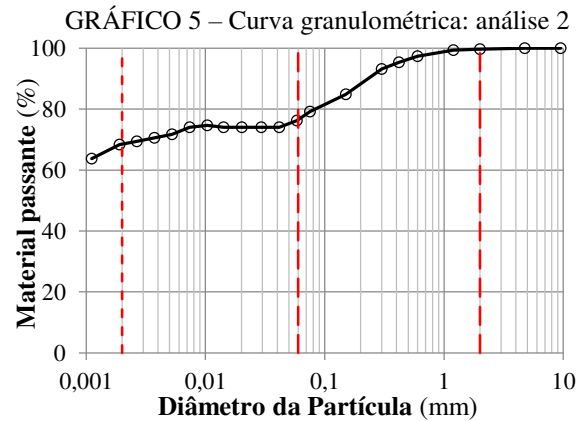
4.3. Caracterização geotécnica do solo

A massa específica dos sólidos foi realizada com duas repetições, conforme recomendações da NBR 6508 (ABNT, 2016b), correspondendo ao valor médio das cinco determinações feitas em casa ensaio, e de modo que nenhuma dessas determinações se diferissem mais de $0,02 \text{ g/cm}^3$ da média entre elas. Os valores obtidos em cada um dos ensaios foi de $2,820$ e $2,837 \text{ g/cm}^3$, e como se diferiram menos de $0,02 \text{ g/cm}^3$ entre si, adotou-se média dos dois valores, $2,828 \text{ g/cm}^3$, como valor de massa específica dos grãos do solo.

A análise granulométrica conjunta foi realizada com duas repetições, conforme recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016e), determinando que o solo é constituído em média de 68% de fração argila, 8% de fração silte, de 23,7% de fração areia e 0,3% de pedregulho, conforme as curvas granulométricas apresentadas nos GRÁFICOS 4 e 5:



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Os limites de plasticidade (LP) e liquidez (LL) do solo foram determinados conforme as recomendações da NBR 7180 (ANBT, 2016d) e a NBR 6459 (ABNT, 2016c). Obteve-se um LP de 31%, determinado pelo inteiro mais próximo a média de um conjunto de três determinações que não apresentaram desvio percentual superior a 5% da média. O LL obtido foi de 91%, e portanto, um índice de plasticidade (IC) de 60%.

Em função dos resultados obtidos na análise granulométrica conjunta e dos limites de plasticidade e liquidez, foi possível classificar o solo segundo o sistema unificado (USC: *Unified Soil Classification*) como uma argila de alta compressibilidade (CH). Na TABELA 13 são apresentados resumidamente os resultados da caracterização geotécnica:

TABELA 13 – Resumo dos resultados da caracterização geotécnica do solo

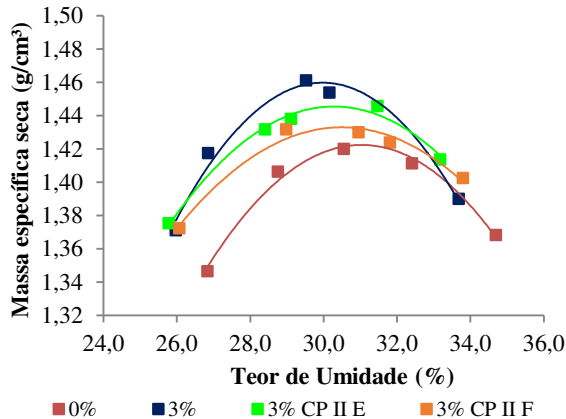
ρ_s (g/cm^3)	Análise granulométrica				Parâmetros de plasticidade			USC
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	LL (%)	LP (%)	IC (%)	
2,828	68	8	23,7	0,3	91	31	60	CH

ρ_s – massa específica dos sólidos; LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IC – índice de plasticidade; USC – *Unified Soil Classification*; CH – argila de alta compressibilidade. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

4.4. Compactação das misturas de solo-licor e solo-licor-cimento

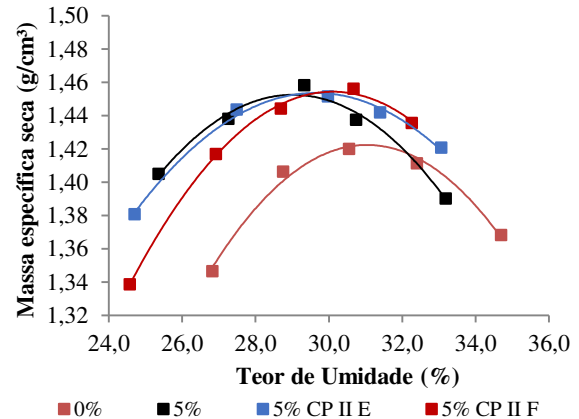
Nos GRÁFICOS 6 e 7 são apresentadas as curvas de compactação do solo natural e as curvas de compactação das misturas, organizadas de acordo com os teores de 3 e 5% de licor negro, respectivamente, e nas TABELAS 14 e 15 encontram-se dispostos os parâmetros ótimos ($w_{ót}$ e $\rho_{máx}$) referente às curvas, bem como o coeficiente de determinação (R^2).

GRÁFICO 6 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas de 3% de licor e licor-cimento



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 7 – Curvas de compactação do solo natural e das misturas de 5% de licor e licor-cimento



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA 14 – Parâmetros ótimos e coeficiente de determinação das curvas de compactação do solo natural e das misturas de 3% de licor e licor-cimento

Mistura	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{máx}$ (g/cm³)	R^2 (%)
■ 0%	31,0	1,422	98,7
■ 3%	30,0	1,460	97,8
■ 3% CP II E	30,3	1,445	98,6
■ 3% CP II F	30,5	1,433	97,6

$w_{ót}$ – umidade ótima; $\rho_{máx}$ – massa específica aparente seca máxima; R^2 – coeficiente de determinação. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA 15 – Parâmetros ótimos e coeficiente de determinação das curvas de compactação do solo natural e das misturas de 5% de licor e licor-cimento

Mistura	$w_{ót}$ (%)	$\rho_{máx}$ (g/cm³)	R^2 (%)
■ 0%	31,0	1,422	98,7
■ 5%	29,0	1,453	97,8
■ 5% CP II E	29,6	1,454	99,2
■ 5% CP II F	30,1	1,454	99,8

$w_{ót}$ – umidade ótima; $\rho_{máx}$ – massa específica aparente seca máxima; R^2 – coeficiente de determinação. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

A partir das curvas de compactação GRÁFICOS 6 e 7 é possível observar que as adições de licor e licor-cimento proporcionaram o aumento na massa específica aparente seca máxima e redução do teor de umidade ótimo em relação ao solo natural. Esse aumento se deve às reações de troca catiônica que ocorreram entre o solo e o licor negro, que promovem a dispersão das partículas de argila, que compõem a fração predominante do solo. O fenômeno da dispersão ocorre quando há o aumento da dupla camada devido ao predomínio de forças repulsivas exercidas por cátions, principalmente monovalentes, que dispõem-se ao redor das partícula de argila, favorecendo o aumento do potencial de Stern e, conseqüentemente manter essa estrutura dispersas no solo.

Para as adições de 3% de licor e cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32, observa-se que os aumentos proporcionados na massa específica aparente seca máxima foram menores que a proporcionada pela mistura sem cimento, tendo o cimento CP II-E-32 proporcionado um aumento maior que o CP II-F-32. Essa diferença pode estar associada à composição química dos cimentos, principalmente em relação à concentração de alumínio e cálcio, normalmente expressos quantitativamente na forma de óxidos de Al_2O_3 e de CaO (principal óxido presente nos cimentos), que atuando conjuntamente na troca catiônica com o solo e o licor, atuam como agentes flocculantes e minimizam os efeitos do licor negro sobre a dupla camada.

Outro fator que pode ser levado em consideração e justificaria o cimento CP II-E-32 ter proporcionado um aumento maior que o CP II-F-32 na massa específica aparente seca máxima é o comportamento da escória e do fíler calcário presentes em cada um dos cimentos. Alguns experimentos constataram que a escória apresenta reação mais lenta no solo quando comparada ao calcário (FORTES, 1993; PRADO; FERNANDES, 2000), de forma que o equilíbrio químico estabelecido entre solução de solo e o CaO proveniente da escória é mais lento que o proveniente do calcário, e conseqüentemente ainda mais lento que o proveniente de um fíler calcário.

Portanto, durante as reações de troca catiônica entre o solo, o licor negro e o cimento, a concentração de CaO disponibilizada pelo cimento CP II-F-32, durante a espera do início de tempo de pega, poderia ser maior que a concentração disponibilizada pelo CP II-E-32, e conseqüentemente os efeitos do CaO proveniente do cimento CP II-F-32 na estabilização da mistura seria maior. Da mesma forma, a concentração de Al_2O_3 , mesmo em menores concentrações que o CaO, poderia ser maior no cimento CP II-F-32 que no CP II-E-32, interferindo significativamente nas reações de troca catiônica da dupla camada, uma vez que o Al^{3+} por apresentar carga trivalente e menor raio atômico, estabelece maior atração eletrostática com as partículas de argila.

Nas misturas com 5% de licor, observa-se que o aumento na massa específica seca máxima das misturas foi o mesmo, independente das adições dos cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32. Provavelmente as concentrações de Al_2O_3 e CaO provenientes dos cimentos, independente das concentrações, não foram suficientes para interferirem significativamente nas reações de troca catiônica da dupla camada, uma vez que as concentrações de Na^+ proveniente do sulfato de sódio e sulfato de sódio, além de outros sais de sódio, que o licor negro pode apresentar, eram maiores.

A partir das TABELAS 14 e 15 observa-se que o solo apresenta massa específica aparente seca máxima de $1,422 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de 31,0%, assim como verifica-se

que as misturas de 3 e 5% de licor negro atingiram os valores de massa específica seca máxima de 1,460 e 1,453 g/cm³, respectivamente, caracterizando aumentos de 2,7 e 2,2% em relação a massa específica seca máxima do solo natural. Em relação ao teor de umidade, observa-se que as adições de licor negro reduziram o teor de umidade ótima das misturas em 1,0 e 2,0% em relação ao teor ótimo do solo natural, sendo a maior redução observada na mistura com 5% de licor negro, e umidade ótima de 29,0%.

Com relação às misturas licor-cimento, observa-se que as misturas com cimento CP II-F-32 apresentaram maior teor de umidade ótimo em relação as misturas como cimento CP II-E-32, indicando que o CP II-F-32 apresenta maior quantidade de aluminato de cálcio e, por essa razão, necessita de maior quantidade de água para a reação de hidratação do aluminato de cálcio, que é mais rápida na hidratação do cimento. Uma maior quantidade aluminato de cálcio no cimento CP II-F-32 corrobora com a premissa de que este poderia apresentar maior concentração de Al₂O₃ em relação ao CP II-E-32, de modo que o Al³⁺ disponibilizado atuou como agente floculante e minimizou os efeitos do licor negro na compactação da mistura.

4.5. Ensaio de permeabilidade

No período de 21 de fevereiro e 14 de dezembro de 2020 foram realizadas 4263 coletas do percolado dos 21 corpos de prova ensaiados, as quais foram armazenadas em 551 potinhos de 30 e 50 mL. Nesse intervalo, foram realizadas 3159 determinações de coeficiente de permeabilidade para os corpos de prova ensaiados, entre 5 de agosto e 14 de dezembro. A média dos valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade a 20°C dos ensaios de permeabilidade, realizados com três repetições, assim como o respectivo desvio padrão e o coeficiente de variação são apresentados na TABELA 16, para o gradiente de 15,2.

TABELA 16 – Análise descritiva dos ensaios de permeabilidade das misturas para as repetições A, B e C

Mistura	Repetição A			Repetição B			Repetição C		
	\bar{k}_{20} ¹	S ¹	CV ²	\bar{k}_{20} ¹	S ¹	CV ²	\bar{k}_{20} ¹	S ¹	CV ²
■ 0%	19	2,3	12,0	26	1,9	7,4	27	1,5	5,8
■ 3%	2,8	0,2	5,5	2,5	0,2	6,8	2,6	0,2	6,4
■ 3% CP II E	18	3,4	19,4*	18	3,5	19,8*	9,3	1,1	12,2*
■ 3% CP II F	6,0	0,6	9,8	6,2	0,6	9,7	6,9	0,3	4,4
■ 5%	5,5	0,3	6,3	4,6	0,3	6,6	5,1	0,3	6,2
■ 5% CP II E	16	2,7	16,6*	10	0,7	6,9	5,3	0,4	7,9
■ 5% CP II F	2,4	0,1	6,3	3,4	0,2	4,9	2,9	0,3	11,7

\bar{k}_{20} – coeficiente de permeabilidade a 20°C médio; S – desvio padrão; CV – coeficiente de variação. ¹ valores em 10⁻¹⁰ m/s; ² valores em %. Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir da TABELA 16 observa-se que as misturas proporcionaram uma redução na

permeabilidade do solo, atingindo uma redução de até 10 vezes, sendo que o solo natural apresentou um \bar{k}_{20} de até $2,6 \times 10^{-9}$ m/s. As misturas com 3% de licor e com 5% de licor-cimento CP II-F-32 foram as que apresentaram menores \bar{k}_{20} , enquanto que as misturas com de 3 e 5% licor-cimento CP II-E-32 foram as que apresentaram o menor desempenho nos ensaios de permeabilidade e, portanto, apresentaram os maiores valores de \bar{k}_{20} . Com relação às misturas com 3% de licor-cimento CP II-F-32 e 5% de licor pode-se afirmar que estas obtiveram um desempenho intermediário em relação às demais misturas.

Com relação ao coeficiente de variação, observa-se que as repetições que apresentaram maior dispersão, valores em negrito, foram a repetição A do solo natural, as repetições A, B e C da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32, a repetição A da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32 e a repetição C da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32, sendo os valores marcados com asterisco (*) as repetições que superaram o maior coeficiente de variação observado no solo natural. Além de apresentarem os menores \bar{k}_{20} , as misturas com 3% de licor e 5% de licor-cimento CP II-F-32 foram que apresentaram os menores desvios padrão, ou seja, as que tiveram menor variabilidade, excetuando o corpo de prova C com 5% de licor-cimento CP II-F-32, que apresentou desvio padrão superior às misturas de desempenho intermediário.

Na literatura, não há informações a respeito de aplicações do licor negro em estudos das propriedades hidráulicas dos solos, para fins geoambientais. O estudo mais próximo à área da engenharia geotécnica e ambiental foi desenvolvido por Vieira (1994), para fins rodoviários, e publicado seguidamente por Vieira et al. (1995a, 1995b).

Vieira (1994) avaliou algumas características mecânicas e hidráulicas de misturas de solos residuais e licor negro concentrado, contendo 55% de sólidos. No estudo foram utilizadas dosagens de 0,25, 0,50, 1, 2, 4 e 6% de sólidos presentes no licor em relação à massa seca de dois siltes inorgânicos de alta compressibilidade (MH), da região da estação de tratamento de água (solo ETA) e do Nova Viçosa (NV), e uma areia siltosa (SM) da região da Vila Secundino. Vieira (1994) também realizou tratamentos com o licor concentrado e 2% de cal e de cimento CP II-E-32, em que estes dois aditivos foram empregados em conjunto e isoladamente.

Vieira (1994) constatou que as adições de licor negro concentrado promoveram um aumento no teor de umidade ótima das misturas e redução da massa específica aparente seca máxima. Mesmo sendo relativamente expressiva a fração de argilas nos dois siltes de alta plasticidade, 40 e 33% para os solos ETA e NV, respectivamente, pode-se afirmar, sobre os resultados de Vieira (1994), que não houve redução significativa no coeficiente de permeabilidade. Ao

contrário disso, seus resultados demonstraram que a permeabilidade apresentou tanto acréscimos na ordem de dez vezes para as misturas de 0,25 e 0,50% de licor negro concentrado, quanto pequenos decréscimos que não ultrapassaram quatro vezes o valor de referência, para as misturas de 1, 2, 4 e 6%. As análises para a areia siltosa, demonstraram que houve uma pequena redução na permeabilidade, não ultrapassando três vezes seu valor de referência. Vieira (1994) esperava que as adições de licor kraft concentrado proporcionassem aumento na permeabilidade das misturas, o que, foi parcialmente observado.

Em imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizadas com o solo ETA, Vieira (1994) e Vieira et al. (1995b) observaram que não há evidências de ocorrer nenhum tipo de reação significativa, entre licor e as partículas do solo, que venham a produzir algum tipo de estrutura cimentante, sendo a mudança textural do solo a alteração mais visível em nível microscópico, onde as partículas de argila, silte e areia tendem a agrupar, formando microagregados organizados e com maiores vazios intersticiais.

Apesar de não haver relatos na literatura de estudos propriamente ditos das propriedades hidráulicas de misturas de solos argilosos e licor negro, há na literatura estudos com resíduos com características alcalinas semelhantes, como dreg e grits, provenientes do processo de clareamento de celulose, para fins agrícolas e rodoviários, de modo que o mecanismo de dispersão das partículas de argila é amplamente difundido. A presença de Na^+ provoca, através do deslocamento do Ca^{2+} e Mg^{2+} dos colóides do solo, a dispersão das argilas e consequente diminuição da condutividade hidráulica do solo, admitindo-se que este efeito surge toda vez que o Na^+ aparece em níveis iguais ou superiores a 15% do complexo sortivo do solo (GLÓRIA, 1992).

Em consequência do sódio e do enxofre fazerem parte do processo de polpação, estes são denominados elementos processuais no licor negro, sendo, caracteristicamente, o teor de sódio no licor negro de 20%, uma vez que o NaOH e Na_2S são os principais componentes de cozimento. A concentração de elementos não processuais, como, K, Cl, Ca, Si, P, Mg varia de acordo com características das matérias primas e dos fatores de acumulação de cada um deles no circuito de recuperação de cada fábrica (MIKKANEN, 2000).

Em alguns casos os efeitos dos resíduos com características alcalinas semelhantes ao Na^+ não são desejados, principalmente para fins agrícolas. O excesso de sódio no complexo sortivo pode provocar a dispersão de argila e diminuição da permeabilidade do solo. Dessa forma, fatores de ordem física podem afetar o desempenho das culturas nestes solos (BISSANI et al., 2004).

Na TABELA 17 são apresentados os parâmetros ótimos de compactação das misturas bem como os parâmetros obtidos no processo de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade. A partir da TABELA 17 observa-se que os teores de umidade dos corpos de prova moldados ficaram bem próximos de seus respectivos valores ótimos, sendo os valores excedidos iguais a 0,75% acima e 0,25% abaixo da ótima. Os teores de umidade dos corpos de prova das misturas com 3% de licor e cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32 foram os únicos que ficam abaixo dos valores ótimos (valores em negrito). Para todas as misturas, os corpos de prova de prova foram moldados com grau de compactação (GC) bem próximo de 100%, destacando a compactação estática como uma forma bastante eficaz no que se diz respeito a controle de compactação e uniformização de lotes de corpos de prova.

TABELA 17 – Parâmetros ótimos de compactação das misturas e os parâmetros obtidos na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade

Mistura/Repetição	w ¹	$w_{ót}$ ¹	Δw ¹	ρ ²	$\rho_{dmáx}$ ²	GC ¹
■ 0%	A			1,421		99,9
	B	31,4	31,0	0,4	1,422	100,0
	C				1,422	100,0
■ 3%	A			1,457		99,8
	B	30,7	30,0	0,7	1,456	100,0
	C				1,457	99,8
■ 3% CP II E	A			1,451		100,4
	B	30,2	30,3	- 0,1	1,453	100,5
	C				1,453	100,5
■ 3% CP II F	A			1,440		100,5
	B	30,2	30,5	- 0,3	1,440	100,5
	C				1,439	100,4
■ 5%	A			1,452		100,0
	B	29,7	29,0	0,7	1,452	100,0
	C				1,452	100,0
■ 5% CP II E	A			1,458		100,3
	B	29,8	29,6	0,2	1,458	100,3
	C				1,461	100,5
■ 5% CP II F	A			1,459		100,3
	B	30,2	30,1	0,1	1,459	100,3
	C				1,459	100,3

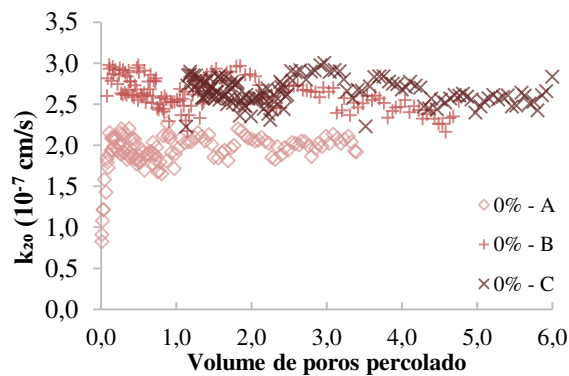
w – teor de umidade de moldagem; $w_{ót}$ – teor de umidade ótimo do ensaio de compactação; Δw – desvio de umidade ($w - w_{ót}$); ρ – massa específica seca obtida na moldagem; $\rho_{dmáx}$ – massa específica seca máxima do ensaio de compactação; GC – grau de compactação.¹ valores em %; ² valores em g/cm³. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

O preparado das misturas com cimento exige maiores cuidados no controle de compactação em relação às demais, sendo necessário considerar um percentual extra de água maior que para as demais misturas, a fim de compensar as perdas durante a moldagem. Outro fato que foi observado é que as reações de hidratação do cimento CP II-F-32 requerem uma quantidade maior de água em relação ao cimento CP II-E-32, de modo que, para percentuais extras de água iguais para os dois cimentos, os teores de umidade atingidos para as misturas com cimento

CP II-F-32 sempre ficam menores dos atingidos pelo cimento CP II-E-32.

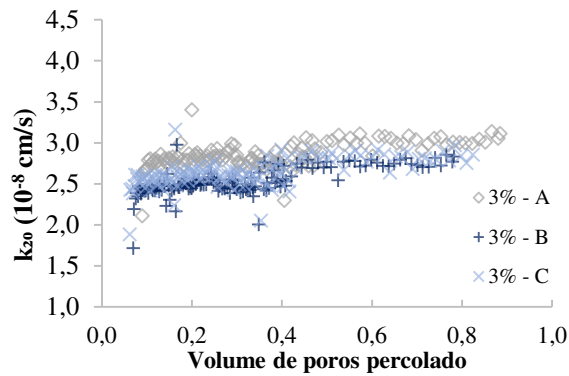
Nos GRÁFICOS 8 a 14 são apresentados os resultados obtidos, para as três repetições, nos ensaios de permeabilidade para o solo natural e para as misturas. As determinações de k_{20} estão expressas em função do volume de poro percolado (vpp), e os gráficos organizados aos pares, exceto o solo natural, de modo que à esquerda são apresentados os resultados das misturas com 3% de licor e à direita os resultados das misturas com 5% de licor.

GRÁFICO 8 – Determinação do k_{20} em função do vpp para o solo natural, 0% licor kraft, sendo A, B e C repetições



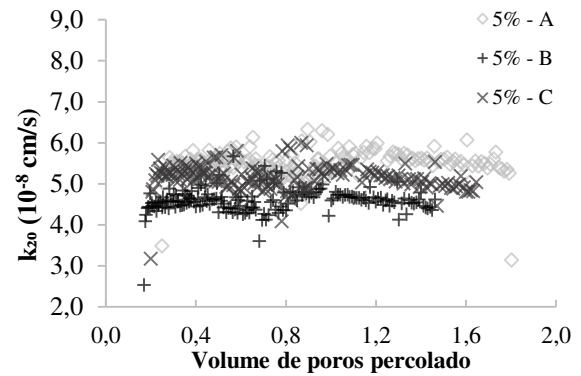
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 9 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor kraft



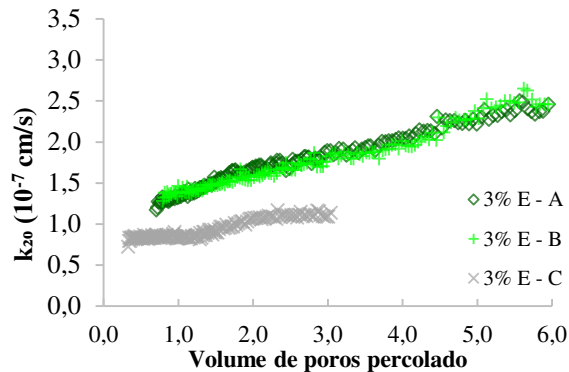
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 10 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor kraft



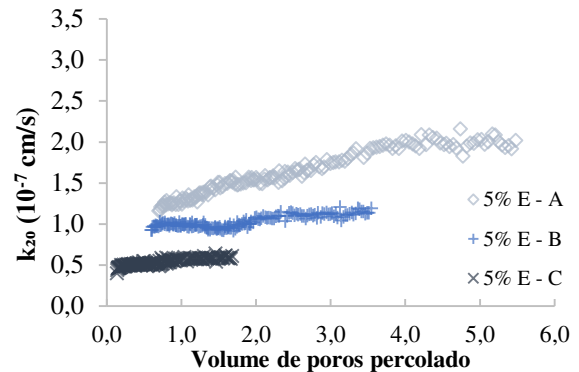
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 11 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor-cimento CP II-E-32



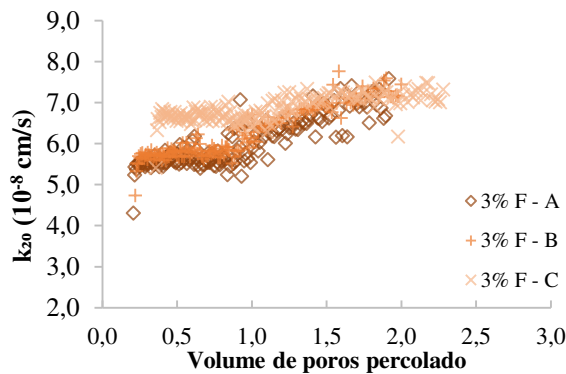
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 12 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor-cimento CP II-E-32



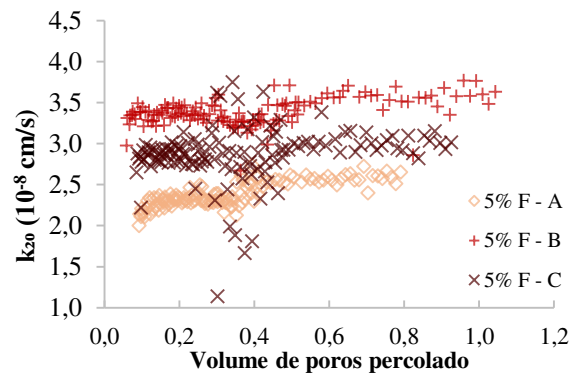
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 13 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 3% licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 14 – Determinação do k_{20} em função do vpp para mistura 5% licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

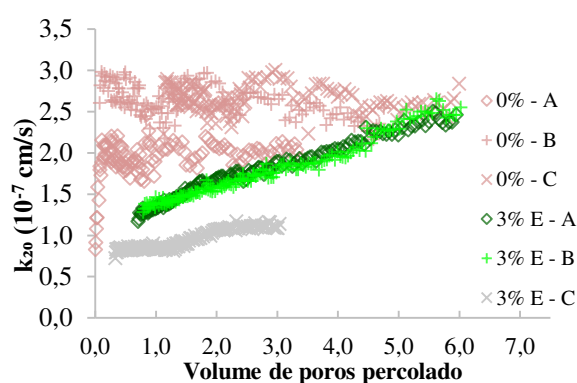
A partir do GRÁFICO 8 é possível observar que as determinações de k_{20} para o solo natural, apesar de pequenas oscilações, apresentaram um comportamento constante em torno de $2,0 \times 10^{-7}$ cm/s para o corpo de A e $2,6 \times 10^{-7}$ cm/s para os corpos de prova B e C. O aumento expressivo dos valores de k_{20} do corpo de prova A, no início do ensaio, são produto do aumento do grau de saturação ao aplicar a pressão de 13,4 cmHg, uma vez que o corpo de prova A não apresentou percolação durante a fase de saturação inicial, sem contrapressão nas células de interface. A presença de ar no interior dos vazios do corpo de prova são obstáculos para o fluxo. Diante disso, à medida que o ar é expulso, os obstáculos são reduzidos, e o coeficiente de permeabilidade aumenta.

Observa-se, a partir dos GRÁFICOS 11 e 12, que os valores de k_{20} para as misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-E-32 apresentaram um aumento progressivo, atingindo valores da ordem de $2,5 \times 10^{-7}$ cm/s. Ainda que essas misturas proporcionaram um aumento na massa específica aparente seca máxima e redução do índice de vazios, os aumentos de k_{20} se equiparam à permeabilidade do solo natural. Esse aumento, em função do volume de poros

percolado, demonstra que o licor-cimento CP II-E-32, para o solo de estudo, não atua como um bom estabilizante à vista das propriedades hidráulicas das misturas que o contém, uma vez que a melhoria proporcionada nessas propriedades não se mantiveram no transcorrer dos ensaios.

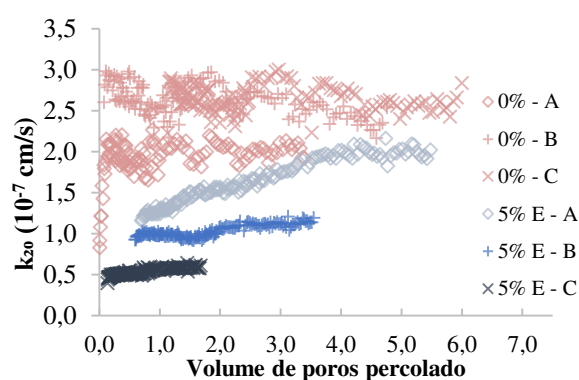
Nos GRÁFICOS 15 e 16 são apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade das misturas 3 e 5% de licor-cimento CP II-E-32, sobrepostos pelos resultados do solo natural, em único tom, evidenciando que a permeabilidade das misturas se aproximaram à permeabilidade do solo natural.

GRÁFICO 15 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 3% licor-cimento CP II-E-32 e solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 16 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 5% licor-cimento CP II-E-32 e solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados do GRÁFICO 15 indicam que, entre 2,5 e 3,5 vvp, os valores de k_{20} para os corpos de prova A e B da mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32 se equipararam aos valores obtidos pelo corpo de prova A do solo natural, e a partir de 4,5 vvp, atingiram aos observados pelos corpos de prova B e C do solo natural. O corpo de prova C da mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32, a partir de 1,3 vpp, começou a manifestar o aumento nos valores de k_{20} , atingindo uma constância próxima de $1,1 \times 10^{-7}$ cm/s, para vpp acima de 2,0.

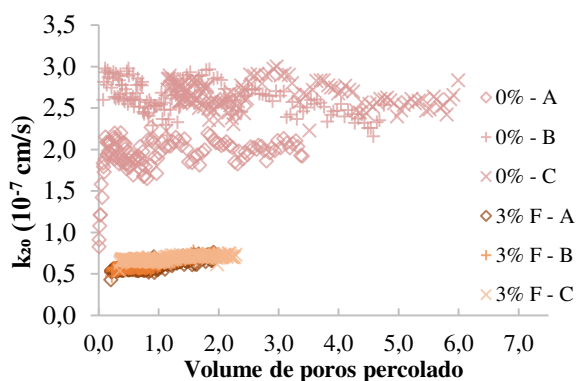
Desse forma, levanta-se a incerteza acerca do quanto os valores de k_{20} da mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32 podem aumentar, e se esse aumento podem ultrapassar o k_{20} do solo natural em um dado vpp.

A partir do GRÁFICO 16 observa-se que, a partir 3,5 vvp, os valores de k_{20} para os corpos de prova A da mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32 se equipararam aos valores obtidos pelo corpo de prova A do solo natural, e atingindo o mesmo comportamento para vpp acima de 4,0. Já os corpos de prova B e C da mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32, apresentaram aumentos menores nos valores de k_{20} , em relação ao corpo de prova A de mesmo tratamento.

Entre as misturas de 3 e 5% de licor e de 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32, resultados apresentados nos GRÁFICOS 9, 10, 13 e 14, a que apresentou maior aumento nos valores de k_{20} foi a de 3% de licor-cimento CP II-F-32. Contudo, esse aumento é praticamente desprezível ao compará-lo aos aumentos sofridos pelas misturas com cimento CP II-E-32, uma vez que os resultados obtidos com essas misturas e o solo natural são de ordem dez vezes maior.

No GRÁFICO 17 são apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade da misturas 3% de licor-cimento CP II-F-32, sobrepostos pelos resultados do solo natural, em único tom, evidenciando que aumento apresentado pelos corpos de prova dessa mistura são desprezíveis em relação à permeabilidade do solo natural. Ainda, pelo GRÁFICO 17 é possível observar que o aumento de k_{20} pelos corpos de prova da mistura é menor que a oscilação das determinações de k_{20} no solo natural.

GRÁFICO 17 – Comparação entre os valores de k_{20} da mistura 3% licor-cimento CP II-F-32 e solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Diante do exposto, pode-se afirmar que as misturas com licor-cimento CP II-F-32, para o solo de estudo, apresentaram um bom desempenho como estabilizante à vista das propriedades hidráulicas, uma vez que a melhoria proporcionada por elas nas propriedades hidráulicas se mantiveram praticamente constantes no transcorrer dos ensaios. Destaca-se, ainda que a mistura com 5% licor-cimento CP II-F-32 obteve valores de k_{20} menores que a mistura com 3% licor-cimento CP II-F-32, se equiparando aos resultados da mistura 3% de licor negro.

4.5.1. Variação das concentrações de Na, K, Mg, Ca, Al e Si presentes no percolado dos ensaios de permeabilidade

As 551 amostras de percolado dos corpos de prova, bem como quatro do licor negro e quatro da água destilada utilizada no ensaio de permeabilidade foram encaminhadas para análise de espectroscopia de absorção atômica, sendo possível determinar a concentração de Na,

K, Mg, Ca, Fe, Al e Si.

Diferente das amostras de licor negro, cujos resultados encontram-se na TABELA 12, as amostras de percolado e água destilada não apresentaram Fe, de modo que, na TABELA 18 são apresentados, para cada mistura (m.) e repetição (A, B e C), a média e respectivo coeficiente de variação para a concentração de Na, K, Mg, Ca, Al e Si encontrados nesse total de 559 amostras.

TABELA 18 – Determinação de Na, K, Mg, Ca, Al e Si por espectroscopia de absorção atômica presentes no percolado, no licor negro e na água destilada utilizada no ensaio de permeabilidade

Mistura / Repetição	Na		K		Mg		Ca		Al		Si		
	[Na] ¹	CV ²	[K] ¹	CV ²	[Mg] ¹	CV ²	[Ca] ¹	CV ²	[Al] ¹	CV ²	[Si] ¹	CV ²	
■ 0%	A	40,9	68,4	0,47	52,8	0,06	39,7	1,64	83,9	0,81	108,8	0,96	69,3
	B	29,5	99,7	0,93	304,2	0,04	68,0	1,84	109,3	1,12	186,5	1,32	162,6
	C	37,8	73,3	0,32	62,4	0,03	81,8	1,20	141,6	0,57	116,3	1,00	60,4
	m.	36,0	78,2	0,56	291,5	0,04	67,4	1,52	114,3	0,81	165,8	1,09	120,7
■ 3%	A	569	32,4	2,42	20,8	0,25*	35,1	1,51	58,8	0,62	120,9	1,53	48,3
	B	550	13,3	2,44	20,7	0,26*	34,9	1,42	26,6	1,03	99,2	1,28	72,1
	C	489	32,4	2,20	19,3	0,22*	22,0	1,46	52,0	0,93	89,4	1,31	72,9
	m.	538	27,2	2,36	20,0	0,24*	31,8	1,47	47,0	0,85	100,2	1,38	61,1
■ 3% CP II E	A	369	95,4	16,8	28,1	0,03	56,3	27,1	75,4	6,45	42,7	6,81	39,2
	B	359	97,1	16,2	30,8	0,04	67,1	29,0	78,8	6,05	49,8	6,57	37,8
	C	499	55,4	19,7	28,6	0,04	59,2	24,6	97,1	7,86	41,7	6,39	32,2
	m.	389	86,5	17,2	30,1	0,03	62,5	27,3	80,8	6,60	46,0	6,63	37,2
■ 3% CP II F	A	625	46,5	32,3	25,8	0,04	44,8	1,07	28,7	15,4	50,1	11,0	66,6
	B	630	43,1	34,5	18,4	0,03	67,1	1,35	77,2	18,0	53,7	9,79	58,6
	C	588	34,3	31,9	17,7	0,03	56,7	1,63	106,8	13,3	57,7	10,2	59,4
	m.	613	40,4	32,9	20,7	0,03	55,8	1,37	89,8	15,5	54,8	10,3	61,1
■ 5%	A	841	45,2	3,59	67,5	0,41*	64,2	2,25	114,2	1,29	135,6	1,69	117,5
	B	1025	42,2	3,19	20,5	0,46*	38,7	2,09	82,7	0,99	86,1	2,02	138,6
	C	1004	41,1	3,22	22,0	0,64*	44,9	1,78	35,4	0,65	133,4	1,60	52,6
	m.	962	42,1	3,35	46,2	0,50*	52,7	2,05	89,7	0,99	127,9	1,76	112,8
■ 5% CP II E	A	562	116,9	18,6	43,7	0,03	166,1	6,22	132,6	10,3	42,8	9,45	34,7
	B	832	88,6	18,8	39,4	0,06	60,8	5,08	141,5	10,0	50,1	9,67	30,3
	C	1359	46,7	23,0	23,1	0,08	49,2	4,63	60,9	10,5	36,4	11,8	30,8
	m.	853	86,5	19,4	39,2	0,05	100,8	5,58	130,0	10,3	44,0	9,90	33,4
■ 5% CP II F	A	1796	26,3	46,6	5,8	0,12	56,3	2,54	48,5	19,7	56,2	8,67	74,8
	B	1604	33,1	41,4	13,1	0,07	51,6	2,09	45,8	23,3	66,9	10,2	73,0
	C	1538	26,0	42,6	8,0	0,08	49,3	2,22	45,0	17,1	59,9	10,3	56,0
	m.	1635	28,6	43,3	10,5	0,09	58,4	2,26	45,6	20,2	62,4	9,83	65,7
Água destilada	18,3	66,9	3,02	25,1	0,10	175,8	1,30	131,6	1,53	104,1	1,32	101,5	
Licor negro	4043	2,9	185	6,0	1,08	95,6	54,5	27,0	332	27,7	28,4	11,7	

[Na] – concentração média de sódio; [K] – concentração média de potássio; [Mg] – concentração média de magnésio; [Ca] – concentração média de cálcio; [Al] – concentração média de alumínio; [Si] – concentração média de silício; CV – coeficiente de variação. ¹ valores em mg/L; ² valores em %. Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Dentre os seis elementos apresentados na TABELA 18, o que apresentou os maiores valores de concentração média para cada uma das misturas e para o solo natural foi o Na. Os acréscimos de licor negro tenderam a aumentar os valores de [Na] nas amostras de percolado, sendo observados para as misturas de 3 e 5% de licor negro valores de [Na] iguais a 538 e 962

mg/L, respectivamente, enquanto que a $[\overline{Na}]$ no solo natural foi igual a 36,0 mg/L. Nas misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-E-32 os valores de $[\overline{Na}]$, 389 e 853 mg/L, foram menores aos observados nas misturas com 3 e 5% licor negro. Em contrapartida, nas misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32 os valores de $[\overline{Na}]$, 613 e 1635 mg/L, foram superiores aos observados nas misturas com 3 e 5% licor negro, sobretudo para a mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32 que apresentou valores de $[\overline{Na}]$ na ordem 45 vezes maior que o solo natural e 1,7 vezes em relação à mistura com 5% de licor negro.

A partir da TABELA 18 observa-se que os valores de $[\overline{K}]$ determinado nas amostras de percolado das misturas de 3 e 5% de licor negro, 2,36 e 3,35 mg/L, foram ligeiramente superiores à concentração média nas amostras do solo natural, 0,56 mg/L, quando comparadas às concentrações médias determinadas nas misturas de licor-cimento. As misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32 foram as que apresentaram os maiores valores de $[\overline{K}]$, 32,9 e 43,3 mg/L, respectivamente, enquanto que as misturas de 3 e 5% licor-cimento CP II-E-32 atingiram valores iguais a 17,2 e 19,4 mg/L.

Com comportamento análogo, os valores de $[\overline{Al}]$ determinados nas amostras de percolado das misturas de 3 e 5% de licor negro, 0,85 e 0,99 mg/L, foram ligeiramente superiores à concentração média nas amostras do solo natural, 0,81 mg/L, quando comparadas às concentrações médias nas misturas de licor-cimento. Da mesma forma, as misturas com de licor-cimento CP II-F-32 apresentaram valores maiores de $[\overline{Al}]$ em relação às misturas que utilizaram o cimento CP II-E-32. Os valores determinados de $[\overline{Al}]$ para as misturas de 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32 foram de 15,5 e 20,2 mg/L, respectivamente, enquanto que as misturas de 3 e 5% licor-cimento CP II-E-32 atingiram valores iguais a 6,60 e 10,3 mg/L.

Em contrapartida, os valores determinados de $[\overline{Ca}]$ foram relativamente próximos para a maioria das misturas, exceto para as misturas com de 3 e 5% licor-cimento CP II-E-32 (valores em negrito). O valor de $[\overline{Ca}]$ determinado para as misturas com de 3% licor-cimento CP II-E-32 superou os de $[\overline{K}]$ e $[\overline{Al}]$, atingindo o valor de 27,3 mg/L, enquanto que para a mistura com 5% licor-cimento CP II-E-32, apesar de menos expressivo, o valor médio foi de 5,58 mg/L e não superou aos encontrados para $[\overline{K}]$ e $[\overline{Al}]$ nessa mistura.

Para o solo natural e as misturas de 3 e 5% de licor e licor-cimento CP II-F-32 os valores de $[\overline{Ca}]$ não apresentaram nenhuma tendência de maneira global com valores de $[\overline{K}]$ e $[\overline{Al}]$. Observou-se que para o solo natural, os valores de $[\overline{Ca}]$ superaram aos de $[\overline{K}]$ e $[\overline{Al}]$, enquanto que para as misturas de 3 e 5% de licor negro, o valor de $[\overline{Ca}]$ foi menor para 3% de licor em relação

ao solo natural, e para 5% de licor, o valor de $[\overline{\text{Ca}}]$ foi superior aos outros dois. Ainda, para as misturas de 3 e 5% de licor negro, os valores de $[\overline{\text{Ca}}]$ foram maiores que os de $[\overline{\text{Al}}]$, mas não superiores aos de $[\overline{\text{K}}]$. Por fim, para as misturas de 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32, os valores de $[\overline{\text{Ca}}]$ foram expressivamente menores que os de $[\overline{\text{K}}]$ e $[\overline{\text{Al}}]$.

Dentre os seis elementos apresentados na TABELA 18, o que apresentou os menores concentrações média foi o Mg, destacando-se que os maiores valores de $[\overline{\text{Mg}}]$ são observados nas misturas com 3 e 5% de licor negro, 0,24 e 0,50 mg/L, respectivamente.

Geralmente na faixa de variação de pH dos solos brasileiros, a principal espécie de Si presente na solução de solo, em equilíbrio com SiO_2 -solo, é H_4SiO_4^0 , e somente a valores de pH superiores a 8,5 é que as espécies iônicas contribuem significativamente para a sílica total em solução (MELLO; PEREZ, 2009). Dessa forma, conhecer as concentrações de Si presente no percolado das misturas no transcorrer dos ensaios e seus valores médios está mais ligada à velocidade de lixiviação e aos campos de estabilidade dos aluminossilicatos e óxidos de ferro, uma vez que o Si não participa dos processos de trocas catiônicas dos colóides do solo.

Uma vez que os cátions da solução do solo estão constantemente em troca catiônica com aqueles adsorvidos ao colóide, a composição iônica da solução do solo reflete a dos adsorvidos (WEIL; BRADY, 2017), é possível levantar os prováveis cátions presente na dupla camada difusa das misturas, a partir dos resultados da TABELA 18 e da variação de concentração desses elementos em função do vpp., apresentados nos GRÁFICOS A.1 a A.42 do apêndice A.

4.5.1.1. Efeito da relação Na^+ - Ca^{2+} na permeabilidade das misturas

Como verificado anteriormente a partir da TABELA 16, as misturas com 3% de licor negro e com 5% de licor-cimento CP II-F-32 foram as que apresentaram o melhor desempenho nos ensaios de permeabilidade, uma vez que obtiveram os menores valores de \bar{k}_{20} . Em contrapartida, as misturas com de 3 e 5% licor-cimento CP II-E-32 foram as que apresentaram o menor desempenho nos ensaios de permeabilidade, visto que a melhoria proporcionada nessas propriedades não se mantiveram no transcorrer dos ensaios, enquanto que pôde-se afirmar que misturas com 3% de licor-cimento CP II-F-32 e 5% de licor foram as que obtiveram um desempenho intermediário em relação às demais misturas.

A partir dos resultados das análises de espectroscopia de absorção atômica apresentados TABELA 18, e dos valores de \bar{k}_{20} apresentados TABELA 16 é possível verificar que as misturas com os maiores valores de $[\overline{\text{Na}}]$ foram, na sua maioria, as que tenderam a apresentar os

menores valores de \bar{k}_{20} . Observa-se, contudo, que o valor de $[\overline{\text{Na}}]$ da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32 foi relativamente alto, sendo o terceiro maior valor, e apesar disso apresentou um dos menores desempenhos nos ensaios de permeabilidade, levando ao pressuposto que a concentração de outro elemento tenha influenciado no comportamento hidráulico da mistura.

A razão para a instabilidade nas propriedades da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32, e conseqüentemente aumento dos valores de k_{20} , pode estar associada aos valores mais elevados de $[\overline{\text{Ca}}]$. O Ca^{2+} , por encontra-se em maior concentração nas misturas com licor-cimento CP II-E-32, pode ter contribuído com a lixiviação do Na^+ e a diminuição do potencial de Stern, dessa forma reduzindo as forças repulsivas e favorecendo a formação de estrutura floculada na mistura.

Em estudos relacionados à capacidade de adsorção de sódio, Kinjo e Marcos (1982) observaram que o acúmulo de Na^+ trocável depende da concentração de Ca^{2+} na solução do solo, sendo que, para os solos estudados, a relação Na^+ - Ca^{2+} trocáveis é linearmente proporcional à relação de Na^+ - Ca^{2+} da solução do solo. Posteriormente, Kinjo et al. (1992), em estudos dos efeitos da aplicação de licor negro junto com fosfogesso na correção da acidez do solo, comprovaram que o aumento da concentração de Ca^{2+} , devido à aplicação de fosfogesso, diminui o teor de Na^+ no solo através do processo de troca catiônica. Isso ocorre em razão do Na^+ ser mais fracamente retido que o Ca^{2+} pelas cargas negativas dos colóides do solo, facilitando a remoção do Na^+ pela lixiviação (SPOSITO, 1989; FASSBENDER; BORNEMISZA, 1994).

Dessa forma, na TABELA 19 são apresentados para cada mistura (m.) e repetição (A, B e C) a média e respectivo coeficiente de variação para a razão $[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$, além dos resultados de média e coeficiente de variação das concentrações de Na e Ca, apresentados inicialmente na TABELA 18, e organizados seguindo a ordem decrescente dos valores de \bar{k}_{20} das misturas.

A partir da TABELA 19 é possível verificar, portanto, que à medida que os valores da razão de $[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$ aumentam entre as misturas, os valores de \bar{k}_{20} tendem a diminuir. Entretanto, a mistura com 3% de licor negro foi a que se destacou com os menores valores de \bar{k}_{20} , mesmo tendo apresentado tanto valores de $[\overline{\text{Na}}]$ quanto de $[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$ inferiores às misturas com 5% de licor negro e 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32. Por ter apresentado o melhor desempenho frente às propriedades hidráulicas, era de se esperar que as amostras de percolado da mistura com 3% de licor negro apresentassem valor expressivo de $[\overline{\text{Na}}]$. Provavelmente, o que

TABELA 19 – Relação dos valores de k_{20} , das concentrações de Na e Ca por espectroscopia de absorção atômica presentes no percolado e relação Na-Ca

Mistura / Repetição	k_{20}		Na		Ca		Na-Ca		
	\bar{k}_{20} ¹	CV ⁴	$[\overline{\text{Na}}]$ ²	CV ⁴	$[\overline{\text{Ca}}]$ ²	CV ⁴	$[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$ ³	CV ⁴	
■ 0%	A	19	12,0	40,9	68,4	1,64	83,9	34	86,2
	B	26	7,4	29,5	99,7	1,84	109,3	34	119,4
	C	27	5,8	37,8	73,3	1,20	141,6	71	75,3
	m.	-	-	36,0	78,2	1,52	114,3	49	95,7
■ 3% CP II E	A	18	19,4	369	95,4	27,1	75,4	20	102,2
	B	18	19,8	359	97,1	29,0	78,8	29	110,5
	C	9,3	12,2	499	55,4	24,6	97,1	38	51,0
	m.	-	-	389	86,5	27,3	80,8	27	96,4
■ 5% CP II E	A	16	16,6	562	116,9	6,22	132,6	215	100,4
	B	10	6,9	832	88,6	5,08	141,5	172	49,9
	C	5,3	7,9	1359	46,7	4,63	60,9	249	13,1
	m.	-	-	853	86,5	5,58	130,0	212	74,6
■ 3% CP II F	A	6,0	9,8	625	46,5	1,07	28,7	587	22,3
	B	6,2	9,7	630	43,1	1,35	77,2	536	24,4
	C	6,9	4,4	588	34,3	1,63	106,8	502	28,7
	m.	-	-	613	40,4	1,37	89,8	537	25,5
■ 5%	A	5,5	6,3	841	45,2	2,25	114,2	591	50,3
	B	4,6	6,6	1025	42,2	2,09	82,7	633	42,7
	C	5,1	6,2	1004	41,1	1,78	35,4	587	8,4
	m.	-	-	962	42,1	2,05	89,7	605	37,7
■ 5% CP II F	A	2,4	6,3	1796	26,3	2,54	48,5	792	31,9
	B	3,4	4,9	1604	33,1	2,09	45,8	701	28,6
	C	2,9	11,7	1538	26,0	2,22	45,0	686	25,8
	m.	-	-	1635	28,6	2,26	45,6	723	28,6
■ 3%	A	2,8	5,5	569	32,4	1,51	58,8	451	14,9
	B	2,5	6,8	550	13,3	1,42	26,6	405	21,8
	C	2,6	6,4	489	32,4	1,46	52,0	460	13,8
	m.	-	-	538	27,2	1,47	47,0	437	17,2

\bar{k}_{20} – coeficiente de permeabilidade a 20°C médio; $[\overline{\text{Na}}]$ – concentração média de sódio; $[\overline{\text{Ca}}]$ – concentração média de cálcio; $[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$ – médias das razões entre a concentração de sódio e cálcio; CV – coeficiente de variação. ¹ valores em g/cm³; ² valores em mg/L; ³ valores em (g/cm³)/(g/cm³); ⁴ valores em %. Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

levou a mistura com 3% de licor negro ter apresentado os menores valores de \bar{k}_{20} foi a redução da massa específica em razão da adição do licor, uma vez que foi a mistura que apresentou o maior aumento de massa específica seca máxima e conseqüentemente a maior redução do índice de vazios.

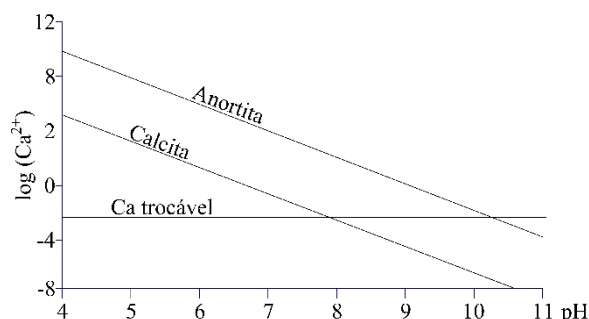
Tendo em vista os valores da razão $[\overline{\text{Na}}]/[\overline{\text{Ca}}]$ da TABELA 19 e que a maior quantidade de Na⁺ é proveniente do licor negro, tem-se que a relação Na⁺-Ca²⁺ da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32, é menor que o da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32. À vista disso, os efeitos da concentração de Ca²⁺ na permeabilidade da primeira mistura, com 3% de licor negro, são mais acentuados que segunda. Esses efeitos podem ser observados nas determinações de k_{20} em função do vpp., GRÁFICOS 11 e 12, evidenciando que a mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32, por apresentar menor relação Na⁺-Ca²⁺, tem uma tendência maior

de se organizar em estrutura floculada, e conseqüentemente aumentar valores de k_{20} . Dessa forma, o aumento nos valores de k_{20} progride à medida que a relação Na-Ca diminui devido a remoção do Na^+ pela lixiviação.

A mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32, apresenta menores valores de $[\overline{\text{Ca}}]$ e maior quantidade de Na^+ proveniente de licor negro, conseqüentemente a relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ é menor. Desse modo, a tendência de se organizar em estrutura floculada é menor que na mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32, e o aumento nos valores de k_{20} tende a ser menor. Contudo, tendo em vista que o percentual de cimento empregado no preparado das misturas de 3 e 5% de licor-cimento CP II-E-32 foi o mesmo, era esperado que valores de $[\overline{\text{Ca}}]$ fossem próximos. A redução dos valores de $[\overline{\text{Ca}}]$ pode estar associada à precipitação de Ca, acreditando-se antecipadamente que a adição de 5% de licor-cimento CP II-E-32 tenha sido suficiente para elevar o pH da mistura, dado o caráter alcalino do licor negro, entre 11,5 e 12,5 (EMPIE; 2009).

Em valores de pH acima de 8,0, a calcita, em relação à anortita e aos demais silicatos cálcicos, é o mineral cálcico mais provável de ser formar, devido a sua maior estabilidade. Em valores de pH menores que 8,0, a atividade de Ca^{2+} na solução de solo passa a ser controlada pelo Ca trocável que, segundo Lindsay (2001) tampona a atividade do Ca^{2+} solúvel em valores próximos a $10^{-2,5}$ mol/L (MELLO; PEREZ, 2009). À vista disso, se a adição de 5% de licor negro for suficiente para elevar o pH da mistura acima de 8,0, o Ca precipitaria em forma de calcita, justificando a menor concentração de Ca na mistura com 5% licor-cimento CP II-E-32 em relação a 3% de licor-cimento CP II-E-32. No GRÁFICO 18 é apresentada a relação da atividade de Ca^{2+} em solução em função do pH.

GRÁFICO 18 – Atividade de Ca^{2+} em solução, como função do pH, em equilíbrio anortita-caulinita e calcita, para ambiente com $[\text{CO}_2] = 0,038\%$



Fonte: adaptado de LINDSAY, 2001, apud MELLO; PEREZ, 2009.

Valores de pH acima de 8,0 em solos devido aplicação de licor negro kraft já foram descritos por autores na literatura. Nos estudos dos efeitos da aplicação de licor negro junto

com fosfogesso na correção da acidez do solo, Kinjo et al. (1992) observaram aumento do pH do solo ao percolar 80 mL de licor negro, seguido de água destilada, em colunas de solo com 20 cm de altura sem tratamento de fosfogesso. O experimento foi conduzido pela montagem de colunas de solo compostas por 10 anéis de diâmetro interno de 2,2 cm, altura de 2 cm e volume interno de 7,6 cm³ e colocados 8 g solo dentro de cada anel. Os primeiros cinco anéis, 1 a 5, em sentido descendente, receberam o tratamento de 0, 122, 244, 488 e 610 mg de fosfogesso por coluna, enquanto que os anéis de número 6 a 10 receberam apenas o solo.

Após a percolação de 80 mL de licor negro, seguido de água destilada, o percolado foi analisado para determinar as concentrações de sódio e cálcio, e a coluna de solo foi seccionada por anel para as determinações de pH do solo e dos teores de sódio e cálcio. Kinjo et al. (1992) observaram que coluna que não recebeu tratamento com fosfogesso foi a que apresentou maiores valores de pH, sendo que o pH do solo, inicialmente 5,0, aumentou para 8,7 no primeiro anel e foi decrescendo a medida que avançava na coluna, atingindo o valor mínimo de 7,6 no último anel.

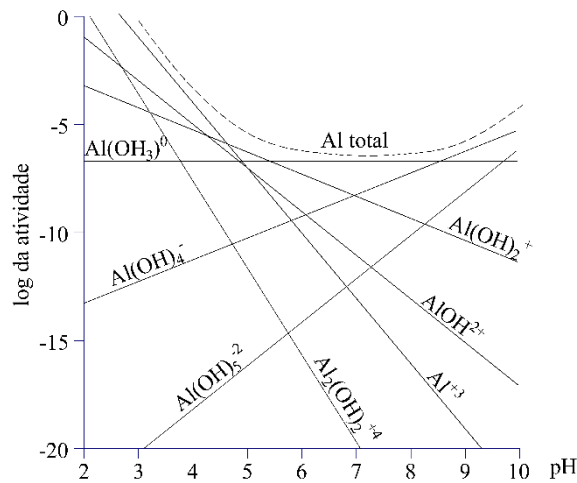
4.5.1.2. Efeito do Al³⁺ na permeabilidade das misturas

A partir dos resultados das análises de espectroscopia de absorção atômica, apresentados TABELA 18, observa-se que as misturas com licor-cimento CP II-E-32 e CP II-F-32 obtiveram os maiores valores de $[\bar{Al}]$. Considerando a série liotrópica, o Al³⁺, por ser trivalente e possuir menor raio iônico, tem maior tendência de ser retido pelas cargas negativas dos colóides do solo em relação ao Ca²⁺ e ao Na⁺. Dessa forma, com base nos resultados da TABELA 18, era de se esperar que valores expressivos de $[\bar{Al}]$ nas misturas produzissem efeitos negativos no desempenho das misturas, principalmente nas misturas com cimento CP II-F-32, que apresentaram maior quantidade de Al.

Em soluções aquosas, O Al³⁺ é coordenado por seis moléculas de água, formando o íon hexa-hidratado Al(H₂O)₆³⁺, e à medida que o pH aumenta, H⁺ é liberado dessas moléculas de H₂O, originando uma série de espécies de Al produtos da hidrólise, por exemplo, Al(H₂O)₅(OH)²⁺, Al(H₂O)₃(OH)₃⁰ e Al(H₂O)(OH)₅²⁻. Com o intuito de simplificar, normalmente as espécies de Al são expressas ocultando-se as moléculas de água de suas fórmulas químicas, ou seja, Al(OH)²⁺, Al(OH)₃⁰ e Al(OH)₅²⁻. Tomando o mineral que controla a atividade total de Al em solução, e a partir das reações e constantes de equilíbrio das hidrólise do Al, é possível obter o diagrama de atividade das espécies de hidrólise de Al em solução (MELLO; PEREZ, 2009). No GRÁFICO 19 é apresentado o diagrama de atividade de Al e suas

espécies de hidrólise em equilíbrio com gibbsita.

GRÁFICO 19 – atividade de Al e suas espécies de hidrólise em equilíbrio com gibbsita



Fonte: adaptado de LINDSAY, 2001, apud MELLO; PEREZ, 2009.

A partir do GRÁFICO 19, observa-se na faixa de pH entre 5,5 e 8,0 a atividade de Al total é mínima. Para valores de pH fora dessa faixa, tem-se que a atividade total de Al tende a aumentar, sendo esse aumento maior para valores de pH abaixo de 5,5 que para valores acima de 8,0. Tem-se ainda que a atividade total de Al para valores abaixo de 5,5 é predominantemente de espécies de alumínio com cargas positivas, por exemplo, Al^{3+} , e para valores acima 8,0, as espécies predominantes apresentam carga negativa, como, o aluminato, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

Em estudos de condutividade eletrosmótica e remediação de solos contaminados com cádmio via eletrosmose, Velten (2008) realizou ensaios de difração de raios-X do mesmo solo do presente estudo, e verificou na fração argila a presença da caulinita como principal mineral, seguido de goethita, hematita e vermiculita com hidróxi-entrecamadas (VHC), porém em baixas e diferentes proporções. No caso da predominância de caulinita no solo, o diagrama de atividade de Al e suas espécies de hidrólise em equilíbrio com caulinita seria semelhante ao diagrama de equilíbrio com a gibbsita, variando apenas a escala do eixo vertical, uma vez que o $\log(\text{Al}^{3+})$ tanto a caulinita, quanto a gibbsita variam na ordem de 10^3 para cada unidade de pH que aumenta ou diminui, conforme as EQUAÇÕES 3 e 4 apresentadas por Mello e Perez (2009).

$$\text{Gibbsita:} \quad \log(\text{Al}^{3+}) = 9,66 - 3\text{pH} \quad (3)$$

$$\text{Caulinita:} \quad \log(\text{Al}^{3+}) = 2,73 - \log(\text{H}_4\text{SiO}_4^0) - 3\text{pH} \quad (4)$$

A partir da EQUAÇÃO 4 é possível observar que para a caulinita a atividade de H_4SiO_4 , além do pH, interfere na atividade de Al^{3+} e de forma análoga na atividade das demais espécies

de hidrólise de Al na solução. Dessa forma, deve-se levar em consideração a atividade de H_4SiO_4 na confecção do diagrama de atividade de Al e suas espécies de hidrólise em equilíbrio com a caulinita.

Tendo em vista que os diagramas de estabilidade para a caulina e gibssita são semelhantes, pode-se afirmar que para valores de pH acima 8,0, a atividade total de Al na solução de solo, em equilíbrio com a caulinita, será predominantemente de espécies de Al com carga negativa, como, o aluminato, $Al(OH)_4^-$. À vista disso, se a adição de licor negro for suficiente para elevar o pH das misturas, como acreditou-se anteriormente, as espécies de Al predominantes nas amostras coletadas de percolado possuiriam cargas negativas, e não produziriam os efeitos negativos esperados no desempenho das misturas, principalmente naquelas que foram utilizadas o cimento CP II-F-32.

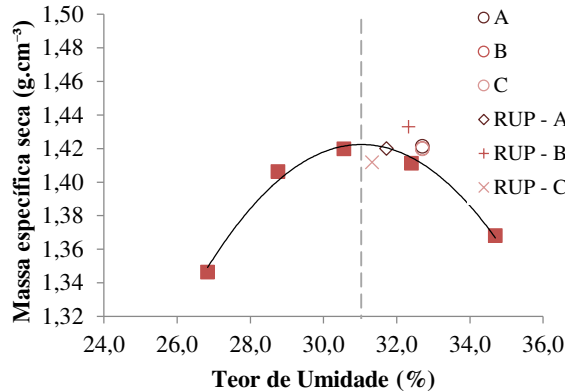
4.6. Ensaio de Compressão Simples

A partir dos testes de velocidade foi possível observar que os corpos de prova, mesmo moldados, envoltos em filme de PVC e armazenados em lotes sob as mesmas condições, independente de adições de licor negro ou cimento, apresentaram variações de volume e teor de umidade durante o processo de cura. No GRÁFICO 20 é apresentada a curva de compactação do solo natural e marcações referente aos parâmetros de compactação dos corpos de prova durante a moldagem (A, B e C) e na ruptura (RUP - A, RUP - B e RUP - C). A partir do GRÁFICO 20 é possível observar que inicialmente os três corpos de prova apresentavam mesmo conteúdo de umidade e mesma massa específica aparente seca, apresentando, durante a cura de 7 dias, diferentes variações no teor de umidade e no volume, que repercutiram na massa específica aparente seca.

No GRÁFICO 21 é apresentado as curvas de resistência à compressão simples dos corpos de prova A, B e C ensaiados com velocidades iguais de 1, 1,25 e 1,5 %/mm, respectivamente. Entre os três corpos de prova, o primeiro (A) foi o que suportou maior tensão de compressão não confinada, 477,80 kPa, atingindo ruptura em um tempo de ensaio maior que os demais e não muito longo, 6 minutos e 30 segundo, tendo em vista que a NBR 12770 (ABNT, 1992) recomenda que o tempo de ruptura não exceda 15 minutos.

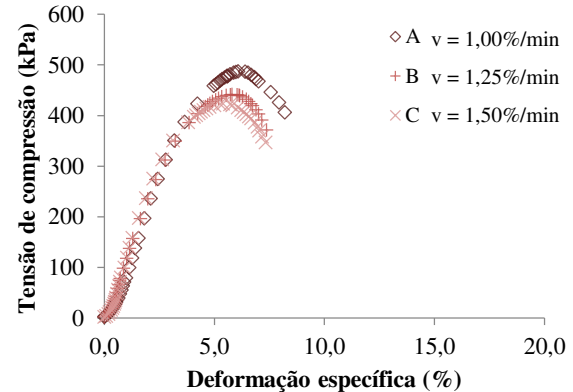
Na TABELA 20 são apresentadas as médias das tensões de compressão máxima (\bar{q}_u) e seus respectivos coeficientes de variação (CV), bem como as médias das deformações axiais específicas na ruptura ($\bar{\epsilon}$), dos teores de umidade na ruptura (\bar{w}_{rup}) e dos desvios de umidade

GRÁFICO 20 – Curva de compactação do solo natural e marcações referente aos parâmetros de compactação dos corpos de prova durante a moldagem e na ruptura



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO 21 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural para testes de velocidade de ensaio



v – velocidade de ensaio. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

em relação às umidades ótimas ($\overline{\Delta w}$), para os corpos de prova do solo natural e das misturas, submetidos à cura de 7 e 28. No Apêndice B, nos GRÁFICOS B.1 a B.46 são apresentadas as curvas de compactação das misturas, junto com as marcações referente aos parâmetros de compactação dos corpos de prova durante moldagem e na ruptura, assim como as curvas $q \times \epsilon$ dos ensaios de compressão simples, semelhantes aos GRÁFICOS 20 e 21. Também são apresentadas nas FIGURAS B.1 a B.23 as fotografias dos lotes de corpos de prova após os ensaios de compressão simples, e nas TABELAS B.1 a B.23 os valores de massa específica aparente seca inicial (ρ_0) e na ruptura (ρ_{rup}), umidade inicial (w_0), umidade na ruptura (w_{rup}), tensão de compressão máxima (q_u) e deformação específica na ruptura (ϵ) de cada corpo de prova.

TABELA 20 – Determinação da resistência à compressão simples do solo natural e das misturas, com tempos de cura de 7 e 28 dias

Mistura	7 dias						28 dias					
	Lote	$\frac{q_u}{\bar{q}_u}$ ¹	CV ²	$\bar{\epsilon}$ ²	$\overline{w_{rup}}$ ²	$\overline{\Delta w}$ ²	Lote	$\frac{q_u}{\bar{q}_u}$ ¹	CV ²	$\bar{\epsilon}$ ²	$\overline{w_{rup}}$ ²	$\overline{\Delta w}$ ²
■ 0%	1°	475,0	13,3	4,7	31,1	0,1	2°	417,6	7,5	5,2	32,0	1,0
	3°	418,3	4,6	5,7	32,1	1,1	-	-	-	-	-	-
■ 3%	1°	300,3	9,5	9,3	31,4	1,4	2°	280,3	10,2	10,9	31,7	1,7
	3°	425,0	3,9	9,3	31,0	1,0	4°	418,0	3,7	9,2	31,0	1,0
■ 3% CP II E	1°	399,3	9,6	3,8	31,7	1,4	2°	417,7	8,6	3,5	31,4	1,1
■ 3% CP II F	1°	215,0	4,8	4,7	34,4	3,9	2°	317,2	4,3	4,9	34,1	3,6
	3°	506,4	8,7	3,7	30,1	-0,4	4°	568,3	2,2	4,3	30,2	-0,3
■ 5%	1°	250,1	2,1	12,6	30,8	1,8	2°	202,1	2,5	13,3	31,3	2,3
	3°	273,6	10,3	12,4	30,0	1,0	4°	230,4	11,4	10,3	30,0	1,0
■ 5% CP II E	1°	352,9	13,6	4,2	30,6	1,0	2°	374,2	15,1	3,5	30,2	0,6
■ 5% CP II F	1°	145,4	15,7	5,1	32,9	2,8	2°	223,8	19,4	5,9	32,8	2,7
	3°	450,9	3,1	4,6	29,6	-0,5	4°	473,5	3,2	4,3	29,4	-0,7

\bar{q}_u – média da tensão de compressão máxima; CV – coeficiente de variação; $\bar{\epsilon}$ – média das deformações axiais específicas; $\overline{w_{rup}}$ – média dos teores de umidade na ruptura; $\overline{\Delta w}$ – média dos desvios de umidade em relação à umidade ótima. ¹ valores em kPa; ² valores em %. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

Os valores assinalados na TABELA 20, marcados em negrito, indicam os lotes que obtiveram os maiores coeficientes de variação na determinação dos valores médios de resistência à compressão simples. Nesses lotes, os valores de tensão de compressão máxima dos corpos de prova divergiram mais que nos outros lotes, em função da variação do peso específico aparente seco e, principalmente, do teor de umidade após o processo de cura. Dessa forma, na análise de resistência do solo natural e das misturas deve-se levar em consideração essas variações e os desvios de umidade.

4.6.1. Resistência do solo natural

A partir da TABELA 20, verifica-se entre os três lotes do solo natural que o 1º lote de corpos de prova apresentou os maiores valores de \bar{q}_u e CV iguais a 475,0 kPa e 13,3%, enquanto que os corpos de prova do 3º e 2º lote apresentaram valores de \bar{q}_u próximos, 418,3 e 417,6 kPa, com valores de CV iguais a 4,6 e 7,5% e teores médios de umidade na ruptura próximos a 32,0%. Acredita-se que os maiores valores de resistência à compressão simples do 1º lote em relação aos demais não sejam em função da ação cimentante das argilas, uma vez que esta não ocorre a curto prazo. A cimentação das argilas ocorre na presença de água e de cátions trocáveis, através da ligação entre as partículas de argila que circundam as de areia e moléculas de água orientadas, de acordo com suas cargas, em direção a cátions trocáveis que se encontram dissociados, formando uma cadeia (RUSSEL, 1961).

O mais provável é que a redução no teor de umidade durante o processo de cura tenha refletido no comportamento mecânico dos corpos de prova do 1º lote. Observa-se no GRÁFICO B.1 e na TABELA B.1 que os corpos de prova A, B e C do 1º lote apresentaram desvios de umidade em torno de 0,9% abaixo da umidade de moldagem e 0,2% abaixo da umidade ótima no transcorrer dos 7 dias de cura, enquanto que o corpo de prova G, do mesmo lote, permaneceu com teor de umidade próximo ao de moldagem. Além disso, os corpos de prova A, B e C do 1º lote apresentaram maior resistência à compressão simples, com valor de \bar{q}_u igual a 503,2 kPa e CV de 6,8%, enquanto que o corpo de prova G obteve q_u de 390,3 kPa. À vista disso, acredita-se que essas reduções no teor de umidade provocam um aumento de sucção, que, até certo limite, atuam aumentando a resistência do solo (CAMAPUM DE CARVALHO, 1985).

Em estudos da distribuição da estrutura dupla de poros do solo, Li e Zhang (2009) observaram através de imagens de elétrons retroespehados (BSE) que, durante o processo de secagem, tanto o volume dos macroporos, poros inter-agregados, quanto o volume dos microporos, poros intra-agregados, diminuem à medida que o grau de saturação diminui. O volume

total do poro também diminui à medida que o grau de saturação diminui, indicando que o solo contrai durante o processo de secagem. Os autores presumiram que os poros diminuem devido ao menisco de água avançando dos poros maiores para poros menores conforme a sucção aumenta. Pires e Bacchi (2010), avaliando as mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada, observaram que as maiores alterações na estrutura de amostras de solo deformadas ocorrem após o primeiro ciclo de umedecimento e secagem do solo, sendo que os ciclos subsequentes apresentam pequeno efeito sobre as variáveis avaliadas.

Lopera (2016), estudando a influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais compactados, observou que aumentos de sucção tenderam a aumentar a resistência à compressão simples do solo. Boszczowski (2008), observou que o aumento da sucção, até certo limite, promove a aproximação das partículas, a densificação dos corpos de prova e conseqüente aumento de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. A partir desse limite, a continuidade de perda de umidade já não aproxima mais as partículas, provocando a formação de fissuras no solo, fragilizando o corpo de prova e reduzindo conseqüentemente a resistência. A influência da sucção no comportamento do solo também foi observada por Weber (2013), destacando que a trajetória de secagem gera um aumento considerável na resistência ao cisalhamento direto do solo, principalmente na parcela coesiva, tornando-o mais rígido e dificultando, inclusive, o deslocamento horizontal das amostras durante a execução dos ensaios.

Portanto, acredita-se que os corpos de prova A, B e C de solo natural do 1º lote apresentaram maior resistência à compressão simples, sendo 29% maior que o corpo de prova G do 1º lote e 20% maior que a média das resistências do 2º e 3º lote, devido ao aumento de sucção ocasionado pela redução do teor de umidade.

4.6.2. Resistência das misturas com licor negro

Em primeiro lugar, verificou-se redução na resistência à compressão simples das misturas estabilizadas com 3 e 5% de licor negro no transcorrer da cura de 7 para 28 dias, como pode ser observado na TABELA 20. Além disso, também é possível observar na TABELA 20 e nos GRÁFICOS B.7 B.9, B.27 e B.29 que o 1º e 2º lote de corpos de prova das mistura com 3 e 5% de licor negro apresentaram desvios de umidade de 1,4 a 2,3% acima dos teores ótimos de umidade de suas respectivas curvas de compactação, e atingiram valores de \bar{q}_u relativamente baixos, na faixa de 200 a 300 kPa. Os resultados de resistência para o 3º e 4º lote, que atingiram desvios de umidade de 1% acima da umidade ótima, foram mais promissores, principalmente

para a mistura com 3% de licor.

Para os lotes com desvios de umidade de 1%, a mistura com 3% de licor negro apresentou valores de \bar{q}_u iguais a 425,0 e 418,0 kPa após de 7 e 28 dias de cura, demonstrando que, apesar de ter ocorrido uma redução na resistência no transcorrer da cura, os valores de resistência aos 28 dias foram similares aos da resistência do solo natural. Já a mistura com 5% de licor negro apresentou valores de \bar{q}_u inferiores ao solo natural e à mistura com 3% de licor, atingindo iguais a 273,6 e 230,4 kPa após 7 e 28 dias de cura. Verificou-se ainda que a redução da resistência no transcorrer da cura também foi mais acentuada para a mistura com 5% de licor negro.

Os indícios de aumento da plasticidade observado durante o preparo das misturas solo-licor para ensaios de compactação e moldagem de corpos de prova também repercutiram nos ensaios de compressão simples. A partir da TABELA 20 é possível observar que o 1º e 2º lote das misturas com 3 e 5% de licor negro demonstraram a tendência de aumentar os valores médios de deformação axial específicas ($\bar{\epsilon}$) conforme o aumento dos desvios de umidade no transcorrer da cura. Por outro lado, o 3º e 4º lote das misturas demonstraram a tendência de reduzir os valores de $\bar{\epsilon}$, ao passo que os desvios de umidade se mantiveram constantes no transcorrer da cura.

Enquanto o solo natural atingiu a ruptura com valores de $\bar{\epsilon}$ de 5,7 e 5,2% para os tempos de cura de 7 e 28 dia, os valores de $\bar{\epsilon}$ para a mistura com 3% de licor foram de 9,3 e 9,2%, e para a mistura com 5% de licor foram de 12,4 e 10,3%. Durante os ensaios compressão simples, as misturas com 3 e 5% de licor apresentaram ruptura dúctil, resistindo por mais tempo ao carregamento enquanto absorviam as deformações, ao passo que o solo natural, após alcançar valores de carregamento máximo, demonstrou queda acelerada nos valores de carga suportada.

Observou-se também que a fissuração dos corpos de prova, ao atingir os máximos carregamentos, progrediam de duas formas. No solo natural, a fissuração iniciava simultaneamente no centro e nas extremidades dos corpos de prova, comunicando-se à medida que as deformações verticais avançavam, como pode ser observado nas FIGURAS 40 e 41. Em contrapartida, a fissuração nas misturas com licor sempre se dava a partir da região central do corpo de prova, e à medida que avançava a abertura de fissuras, elas se estendiam para as extremidades. Outro fator observado foi que nas misturas com 3% de licor a fissuração iniciava por uma única fissura, enquanto que na mistura com 5% de licor, a fissuração iniciava por um agrupamento descontínuo de pequenas fissuras, unindo-se no decorrer das deformações verticais, conforme apresentado nas FIGURAS 42 a 45.

FIGURA 40 – Início da fissuração no solo natural: presença de fissuras no centro e extremidades do corpo de prova



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 41 – Avanço da fissuração no solo natural: comunicação das fissuras do centro com as das extremidades do corpo de prova



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 42 – Início da fissuração na mistura com 3% de licor: presença de fissuras apenas no centro do corpo de prova



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 43 – Avanço da fissuração na mistura com 3% de licor: abertura das fissuras centrais e avanço para as extremidades



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 44 – Início da fissuração na mistura com 5% de licor: presença de fissuras apenas no centro do corpo de prova



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 45 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor: abertura das fissuras centrais e avanço para as extremidades



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

É possível observar nas FIGURAS 40 a 45, assim como nas FIGURAS B.1 a B.23, que durante a deformação vertical, a superfície lateral dos corpos de prova com adições de licor

tendem a curvar-se, com o aumento do raio na porção central do corpo de prova. Em contrapartida, os corpos de prova de solo natural sofrem apenas um pequeno achatamento, seguido do destacamento de algumas partes antes mesmo que pudesse sofrer achatamentos expressivos iguais as misturas com licor.

Vieira (1994) analisou a resistência à compressão simples de misturas com 0, 0,25, 0,50, 1, 2 e 4% de licor negro, utilizando dois processos cura distintos: câmara úmida por 1, 4, 7, 14 e 28 dias; e incubadora (BDO) a 30°C, onde os corpos de prova dos solos ETA e NV (MH) eram mantidos até atingir umidades de 30, 27, 24, 21, 18, 15 e 12% e do solo VS (SM) até atingir umidades de 11, 9, 7 e 5%. Dos 15 tratamentos com licor negro seguidos de cura úmida, a maioria resultou em valores de resistência menores que os obtidos para os solos naturais, destacando-se apenas dois tratamentos que obtiveram acréscimos de resistência. Os solos ETA e NV, com adições de 0,50% de licor negro atingiram acréscimos de resistência de 30 e 19%, respectivamente, aos 28 dias de cura. Viera (1994) verificou a presença de fungos nos corpos de prova submetidos à cura úmida, sendo mais acentuada em misturas com os solos ETA e NV. É possível identificar em suas observações que para dosagens crescentes de licor, menores foram os tempos de cura necessários para a manifestação dos fungos.

É possível observar nos resultados de Viera (1994) que, para os solos MH em incubadora, houve pequenos acréscimos de resistência em função da redução do teor de umidade, até determinado limite, a partir do qual a redução contínua do teor de umidade acarretava também em redução da resistência. O tratamento que apresentou maior eficácia foi o com 1% de licor negro, sendo observados acréscimos de resistência de 13% nos solos ETA e NV nos teores de umidade de 24 e 21%, respectivamente. Por sua vez o solo VS apresentou acréscimos contínuos de resistência em função da redução do teor de umidade, sendo que os tratamentos com 0,25 e 0,50% de licor apresentaram resistência inferior ao solo natural, e a partir do tratamento com 1% de licor os valores de resistência tenderam a ser maiores que o do solo natural. Para os tratamentos do solo VS com 1, 2 e 4% de licor negro, em umidade de 9%, os acréscimos de resistência foram de 1,8, 5,2 e 21% respectivamente.

Vieira (1994) discorre que a perda progressiva no teor de umidade dos solos ETA e NV eleva o volume de poros presente no solo, favorecendo o surgimento de um maior número de pontos de fraqueza e a redução de coesão. Contudo não deixa claro a origem do aumento da resistência nos solos, podendo ser o aumento de sucção. As reduções de umidade em que Vieira (1994) obteve as maiores resistências foram da ordem de 6 a 10% em relação às curvas de compactação das misturas, de modo que o aumento de sucção proporcionado pela redução do

teor de umidade poderia justificar os aumentos de resistência. O aumento de sucção poderia, inclusive, ter potencializado a redução de resistência a partir de determinado limite, baseando-se nas constatações de Boszczowski (2008), que a continuidade de perda de umidade já não aproxima mais as partículas, provocando a formação de fissuras no solo e reduzindo consequentemente a resistência.

4.6.3. Resistência das misturas com licor-cimento

Em primeiro lugar, verificou-se aumento na resistência à compressão simples das misturas estabilizadas com 3 e 5% de licor-cimento no transcorrer da cura de 7 para 28 dias, e que as resistências das misturas com 3% superaram as de 5% de licor-cimento, independente do cimento utilizado, como pode ser observado na TABELA 20, evidenciando que o licor negro interfere diretamente nos processos de cura e de resistência das misturas licor-cimento.

Além disso, também é possível observar na TABELA 20 e nos GRÁFICOS B.19, B.21, B.39 e B.41 que o 1º e 2º lote de corpos de prova das misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-F-32 apresentaram desvios de umidade de 2,7 a 3,9% acima dos teores ótimos de umidade de suas respectivas curvas de compactação, e atingiram valores de \bar{q}_u relativamente baixos, na faixa de 140 a 320 kPa. Em contrapartida, o 3º e 4º lote das misturas cimento CP II-F-32, também apresentados nos GRÁFICOS B.23, B.25, B.43 e B.45, apresentaram redução do teor de umidade no transcorrer da cura de 7 e 28 dias, atingindo desvios de umidade de até 0,7% abaixo da umidade ótima de suas respectivas curvas. As misturas com 3 e 5% de licor-cimento CP II-E-32, também apresentados nos GRÁFICOS B.15, B.17, B.35 e B.37, apresentaram desvios de umidade de 0,6 a 1,4% acima dos teores ótimos de umidade de suas respectivas curvas de compactação, e os resultados de resistência foram menos promissores que os obtidos com as misturas de licor-cimento CP II-F-32, principalmente para a mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32.

Para os desvios de umidade abaixo da umidade ótima, a mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32 apresentou valores de \bar{q}_u iguais a 506,4 e 568,3 kPa após 7 e 28 dias de cura, demonstrando que a mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32 superou já nos 7 dias de cura os valores de \bar{q}_u obtidos pelos corpos de prova A, B e C do 1º lote de solo natural e, no transcorrer dos 28 dias de cura, a resistência da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32 superou em 13% a do solo natural. Por sua vez, a mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32 apresentou valores de \bar{q}_u menores, iguais a 450,9 e 473,5 kPa após 7 e 28 dias de cura, superando a resistência dos lotes de solo natural apenas dos que apresentaram desvios de umidade de 1%

acima da umidade ótima. Durante o rompimento do 3º e 4º lote das misturas com licor-cimento CP II-F-32, observou-se redução de volume dos corpos de prova de até 2,0% e consequente aumento da massa específica aparente seca, como podem ser observados nos GRÁFICOS B.23, B.25, B.43 e B.45, evidenciando que o decréscimo de umidade nos corpos de prova promoveram aumentos de sucção que contribuiram positivamente com a resistência das misturas.

As misturas com licor-cimento CP II-E-32 apresentaram desvios de umidade de 1% acima dos teores ótimos de umidade de suas respectivas curvas de compactação, e atingiram valores médios de resistência menores que as misturas com licor-cimento CP II-F-32, verificando-se ainda que os acréscimos de resistência no transcorrer da cura nessas misturas também foram menores. A mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32 apresentou valores de \bar{q}_u iguais a 399,3 e 417,7 kPa após 7 e 28 dias de cura, demonstrando que, apesar da resistência aos 7 dias ter sido inferior à resistência do solo natural, ela foi alcançada ao final 28 dias.

Por sua vez, a mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32 apresentou valores de \bar{q}_u menores, iguais a 352,9 e 374,2 kPa após 7 e 28 dias de cura, superando apenas a resistência do 3º e 4º lote da mistura com 5% de licor negro, que também apresentaram desvios de umidades de 1% acima da umidade ótima. Durante o rompimento do 2º lote da mistura com 5% licor-cimento CP II-E-32, observou-se redução de volume dos corpos de prova de até 1,4% e aumentos da massa específica aparente seca, como pode ser observado nos GRÁFICO B.37, evidenciando que possa ter ocorrido um pequeno aumento de sucção que contribuísse positivamente com a resistência da mistura.

Apesar da umidade do 3º e 4º lote das misturas com cimento CP II-F-32 terem ficado abaixo da ótima da curva de compactação e de terem apresentado aumento de massa específica aparente seca devido ao aumento da sucção, que tendem a aumentar a rigidez do solo, como foi constatado por Weber (2013), foram as misturas com o cimento CP II-E-32 que apresentaram as menores valores de $\bar{\epsilon}$ durante o estudo, mesmo tendo sido moldadas e rompidas em teores acima dos valores ótimos das curvas de compactação. Isso evidencia que o cimento CP II-E-32 é mais eficaz em reduzir a plasticidade conferida pelo licor negro, contudo, esse efeito também pode ter repercutido na resistência à compressão das misturas licor-cimento.

Observou-se também que a fissuração dos corpos de prova das misturas com licor-cimento ocorre ao atingir os máximos carregamentos, verificando-se que não existe um padrão definido para o desenvolvimento das fissuras. Independente do cimento utilizado, algumas fissuras iniciavam simultaneamente no centro e nas extremidades dos corpos de prova, comunicando-se à medida que as deformações verticais avançavam. Da mesma forma, também foram

observadas fissuras que iniciavam a partir da região central do corpo de prova, e outras a partir das extremidades, estendendo-se sobre o corpo de prova a medida que se desenvolvia as deformações verticais. Nas FIGURAS 46 a 49 são apresentadas o início da fissuração de alguns corpos de prova de misturas licor-cimento.

FIGURA 46 – Início da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32: presença de fissuras no centro e extremidade superior do corpo de prova



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 47 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32: encontro das fissuras do centro com as das extremidades



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 48 – Início da fissuração na mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32: presença de fissuras na base do corpo de prova e iniciando na parte central



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 49 – Avanço da fissuração na mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32: encontro das fissuras do centro com as das extremidades



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

Sobre a superfície de alguns corpos de prova das misturas licor-cimento CP II-F-32 foi verificado o aparecimento de fungos após 28 dias de cura, como pode ser observado nas FIGURAS 50 e 51, sendo que em apenas um corpo de prova a quantidade foi realmente expressiva. Apesar disso, não foi constatado nenhum comprometimento da resistência dos corpos de prova.

Vieira (1994) analisou a resistência à compressão simples dos solos NV (MH) e VS (SM) utilizando a estabilização conjunta de 0,25, 1 e 4% de licor negro e 2% de cal hidratada e 2% de cimento CP II-E-32 seguida de cura úmida de 7, 14 e 28 dias, verificando que a utilização da cal hidratada e cimento CP II-E-32 contribuíram com a resistência das misturas. Para o solo

FIGURA 50 – Desenvolvimento predominante de fungo em corpo de prova de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

FIGURA 51 – Desenvolvimento de fungo nas bordas de corpo de prova de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: arquivo pessoal do autor, 2021.

VS, as misturas licor-cimento apresentaram resistências maiores que as misturas licor-cal, enquanto que para solo NV, a resistência das misturas licor-cimento superou a das misturas licor-cal apenas para teores de 0,25 e 1% de licor. Para teores de 4% de licor negro e solo NV, a resistência das misturas licor-cal superou a das misturas licor-cimento.

Tanto para as misturas com licor-cal quanto licor-cimento foi observado redução de resistência com o acréscimo das dosagens de licor. Para o solo NV, as misturas com 0,25, 1 e 4% de licor-cal apresentaram aumentos de resistência de 160, 98 e 70% em relação ao solo natural, respectivamente, enquanto que os aumentos de resistência apresentados pelas misturas com 0,25, 1 e 4% de licor-cimento foram de 168, 136 e 39% em relação ao solo natural. Já para o solo VS, as misturas com 0,25, 1 e 4% de licor-cal apresentaram aumentos de resistência de 496, 281 e 145% em relação ao solo natural, e os aumentos de resistência apresentados pelas misturas com 0,25, 1 e 4% de licor-cimento foram de 524, 403 e 208% em relação ao solo natural.

Apesar da resistência à compressão simples das misturas com licor-cal e licor-cimento terem superado a resistência dos solos naturais, os valores encontrados não foram maiores o suficiente para atingir as expectativas esperadas por Vieira (1994). Foi constatado pelo autor que as maiores resistências ocorreram para dosagens com menor percentual de licor, e que os acréscimos diferenciais entre 7 e 28 dias de cura foram mais acentuados para as misturas licor-cal. Vieira (1994) também observou o desenvolvimento de fungo apenas nos corpos de prova das misturas com licor-cimento CP II-E-32.

4.7. Ensaios de adensamento CRS

Foram realizados 23 ensaios de adensamento CRS utilizando o topos e bases dos corpos

de prova dos ensaios de permeabilidade. Foram realizados dois testes de velocidades de ensaio utilizando o topo dos corpos de prova (A) do solo natural e da mistura com 3% de licor negro, a partir dos quais foi definido que os ensaios com o solo natural e as misturas com 3 e 5% de licor negro seriam executados em velocidades de 0,10 mm/min e as misturas com 3 e 5% de licor-cimento em velocidades de 0,15 mm/min. Os parâmetros de velocidade de ensaio, índice de vazios inicial (e_0) e pós-adensamento (e_f), umidade inicial (w_0) e pós-adensamento (w_f), saturação inicial (Sr_0), coeficiente de adensamento inicial (c_{v0}), final (c_{vf}) e final médio ($\overline{c_{vf}}$) são apresentados na TABELA 21. Nos GRÁFICOS C.1 a C.28 do Apêndice C são apresentadas as curvas: (i.) e vs $\log(\sigma')$; (ii.) u_b/σ_v vs σ_v ; (iii.) k_{20} vs e ; e (iv.) c_v vs σ' .

TABELA 21 – Parâmetros iniciais e finais dos ensaios de adensamento CRS

Mistura/ Repetição	Posição ¹	Velocidade ²	e		w		Sr_0 ³	c_v		
			e_0	e_f	w_0 ³	w_f ³		c_{v0} ⁴	c_{vf} ⁴	$\overline{c_{vf}}$ ⁴
■ 0%	A (T)	0,15	0,991	0,719	34,8	34,4	0,994	7157,4	38,1	36,1
	A (B)	0,10	0,991	0,768	34,8	32,6	0,994	52927,7	37,6	
	B (B)	0,10	0,988	0,786	34,9	32,4	1,000	144661,9	34,2	
	C (B)	0,10	0,988	0,785	35,0	32,6	1,000	67475,5	34,3	
■ 3%	A (T)	0,15	0,940	0,720	31,9	30,9	0,961	167295,5	31,2	22,9
	A (B)	0,10	0,940	0,733	32,3	31,2	0,973	18978,0	24,4	
	B (B)	0,10	0,943	0,748	31,7	30,4	0,949	26261,2	19,0	
	C (B)	0,10	0,940	0,774	31,8	30,0	0,958	62867,5	16,9	
■ 3% CP II E	A (B)	0,15	0,949	0,840	32,8	32,2	0,976	8693,3	161,0	194,5
	B (B)	0,15	0,947	0,836	33,0	32,6	0,986	47535,9	181,2	
	C (B)	0,15	0,948	0,829	32,7	32,7	0,975	228977,0	241,2	
■ 3% CP II F	A (B)	0,15	0,963	0,852	32,7	32,7	0,961	3449,6	116,7	165,4
	B (T)	0,15	0,963	0,829	33,4	33,4	0,981	143130,5	207,4	
	C (B)	0,15	0,966	0,831	33,5	34,0	0,980	62320,5	172,2	
■ 5%	A (B)	0,10	0,948	0,757	32,4	30,5	0,968	4505,4	10,7	13,3
	B (B)	0,10	0,948	0,742	32,7	30,0	0,975	36157,8	13,3	
	C (B)	0,10	0,948	0,753	32,1	29,7	0,958	40354,4	15,8	
■ 5% CP II E	A (B)	0,15	0,940	0,826	31,9	31,8	0,961	4202,7	200,7	148,3
	B (B)	0,15	0,940	0,796	33,1	32,6	0,995	4069,2	141,0	
	C (B)	0,15	0,935	0,817	31,4	31,3	0,950	194311,6	103,3	
■ 5% CP II F	A (B)	0,15	0,939	0,811	31,5	31,9	0,947	141153,5	255,7	176,1
	B (B)	0,15	0,939	0,827	31,9	31,7	0,961	192504,0	120,6	
	C (B)	0,15	0,939	0,797	31,6	31,8	0,951	206719,8	151,9	

e_0 – índice de vazios inicial; e_f – índice de vazios pós-adensamento; w_0 – teor de umidade inicial; w_f – teor de umidade pós-adensamento; Sr_0 – grau de saturação inicial; c_{v0} – coeficiente de adensamento inicial; c_{vf} – coeficiente de adensamento final; $\overline{c_{vf}}$ – coeficiente de adensamento final médio. ¹ T – topo; B – base; ² valores em mm/min; ³ valores em %; ⁴ valores em m²/ano. Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

A partir da TABELA 21 e dos sete gráficos de c_v vs σ' apresentados no Apêndice é possível observar que apesar da divergência dos valores iniciais de coeficiente de adensamento das misturas, esses valores tendem a convergir à medida que se transcorre o ensaio de adensamento CRS. Para os carregamentos de até 836 kgf, foi possível obter valores médios dos coeficientes de adensamento com menores desvios para o solo natural e as misturas com 3 e 5% de licor negro. Provavelmente, se houvesse prosseguido com os carregamentos, os valores médios dos coeficientes de adensamento para as misturas com licor-cimento continuariam convergindo,

contudo, dada a capacidade de 1000 kgf do anel dinamométrico, não foi possível prosseguir com os carregamentos. Para as misturas licor-cimento poderia ter sido utilizado um anel dinamométrico com capacidade maior, por exemplo, 5000 kgf, contudo, para os menores níveis de carregamento, maiores são as imprecisões nos resultados.

Observa-se ainda, que os valores médios do coeficiente de adensamento das misturas de 3 e 5% de licor negro foram menores que do solo natural e tenderam a diminuir em função dos acréscimos de licor nas dosagens e indicam conseqüente aumento na plasticidade das misturas. Esse aumento de plasticidade foi observado durante a dosagem e preparo das misturas e também quantificado em ensaios de limites de plasticidade e liquidez por Vieira (1994; 1995b). Geralmente observa-se que o coeficiente de adensamento do solos diminui à medida que o limite de liquidez aumenta (DAS, 2011), de modo que pode-se afirmar que o c_v mensura a capacidade do solo saturado dissipar os excessos de poropressão em relação a capacidade de retê-los, e quanto maior o valor do c_v , mais rapidamente se processa a dissipação desses excessos de poropressão.

Verificou-se no solo natural e na mistura com 3% de licor negro, ensaiados nas duas velocidades, que quanto maiores as velocidades de carregamento, menores tendem a ser os índices de vazios ao final de ensaio, mas de modo geral não prejudicam significativamente as curvas e vs $\log(\sigma')$, como pode ser observado nos GRÁFICOS C.1 e C.5. Lima (1996) e Silva (2018) observaram que as curvas de compressibilidade e vs $\log(\sigma')$ não se mostraram muito sensíveis à variação de velocidade dentro dos espectros adotados em seus estudos.

Observou-se também que as repetições dos ensaios de permeabilidade que apresentaram valores de k_{20} mais próximos foram também apresentaram as maiores semelhanças nos ensaios de adensamento CRS, por exemplo, os corpos de prova de solo natural - B e C, e os corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32 - A e B. Nos resultados desses corpos de prova suas curvas e vs $\log(\sigma')$ tendem a coincidir, assim como os valores de k_{20} nas curvas k_{20} vs e apresentam a tendência de convergir.

Para as velocidades de 0,15 e 0,10 mm/min, o solo natural foi o que manteve melhor tendência no desenvolvimento e menores flutuações nos valores de poropressão de modo que respeitasse a razão u_b/σ_v entre 3 e 15% na região normalmente adensada do carregamento, como recomendado pela D 4186 (ASTM, 2012). Em alguns dos ensaios, as misturas com 3 e 15% de licor negro superaram essa faixa, mas isso não invalida os resultados, uma vez que alguns autores, por exemplo, Carvalho et al. (1993), sugerem limites menos restritivos tais que a razão

u_b/σ_v sejam inferiores 30%. As misturas com licor-cimento CP II-E-32 e CP II-F-32 apresentaram valores menores de u_b/σ_v na faixa normalmente adensada de carregamento, contudo, as misturas com 5% de licor-cimento CP II-E-32 e 3% de licor-cimento CP II-F-32 apresentaram aumentos expressivos na razão u_b/σ_v na faixa pré-adensada do carregamento, e tenderam a reduzir antes que atingisse a faixa normalmente adensada.

5. CONCLUSÕES

A necessidade de novas tecnologias e/ou metodologias, viáveis economicamente, aplicáveis à alteração das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos torna-se cada vez mais importantes para a estabilização dos solos compactados, com finalidade de aplicar em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários. A combinação de técnicas de estabilização química e mecânica no solos alteram as propriedades geotécnicas dos solos, possibilitando reduzir a permeabilidade a fim de atender satisfatoriamente as condições de projeto de camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários.

O estudo teve como objetivo geral analisar os efeitos da estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo argiloso de alta compressibilidade. Procurou-se quantificar, em laboratório, a influência do licor negro kraft e dos cimentos CP II-E-32 e CP II-F-32 sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas do solo. Com base nos resultados obtidos nos experimentos com as misturas de licor negro e licor-cimento com um solo argiloso de alta compressibilidade (CH) de Viçosa, pode-se concluir:

i. as adições de licor e licor-cimento proporcionaram o aumento na massa específica aparente seca máxima e redução do teor de umidade ótimo em relação ao solo natural. As misturas com 3 e 5% de licor negro proporcionaram aumentos de 2,7 e 2,2% em relação a massa específica seca máxima do solo natural e reduziram o teor de umidade ótima das misturas em 1,0 e 2,0% em relação ao teor ótimo do solo natural respectivamente. As misturas com 3% de licor-cimento CP II-E-32 e CP II-F-32 apresentaram aumentos na massa específica aparente seca máxima e redução do teor de umidade ótimo em relação ao solo natural menos expressivos. As misturas com 5% de licor-cimento CP II-E-32 e CP II-F-32 apresentaram aumentos na massa específica aparente seca máxima similares ao proporcionados a misturas com 5% de licor negro, e redução do teor de umidade ótimo menos expressiva em relação ao solo natural;

ii. as misturas de licor negro apresentaram melhor desempenho como estabilizante à vista das propriedades hidráulicas que mecânicas, visto que apesar de contribuírem com a redução da permeabilidade, também foi observado redução de resistência à compressão simples dos corpos de prova;

iii. as misturas com licor-cimento CP II-E-32 não atuaram como bons estabilizantes à vista das propriedades hidráulicas e mecânicas das misturas, uma vez que a melhoria proporcionada na redução no coeficiente de permeabilidade não se manteve no transcorrer dos ensaios, e a

resistência à compressão simples dos corpos de prova com curas úmidas de 7 e 28 dias foi inferior a do solo natural;

iv. as misturas com licor-cimento CP II-F-32, apresentaram melhor desempenho como estabilizante à vista das propriedades hidráulicas e mecânicas, visto que proporcionaram redução na permeabilidade, e essa melhoria se manteve praticamente constante no transcorrer dos ensaios, e as resistências à compressão simples foram superiores ao do solo natural. Destaca-se, ainda que as misturas com licor-cimento CP II-F-32 apresentam maior tendência de aumento de sucção em razão da redução do teor de umidade no processo de pega do cimento;

v. apesar dos valores iniciais de coeficiente de adensamento divergirem, esses valores tendem a convergir à medida que se transcorre o ensaio de adensamento CRS. Os valores médios do coeficiente de adensamento das misturas de 3 e 5% de licor negro foram menores que do solo natural e tenderam a diminuir em função dos acréscimos de licor nas dosagens, indicando o aumento na plasticidade proporcionado pelo licor negro kraft. Geralmente o coeficiente de adensamento dos solos diminui à medida que o limite de liquidez aumenta; e

vi. a estabilização combinada do licor negro kraft de madeira de pinus e cimento CP II-F-32 mostra-se promissora para fins geoambientais, contudo afirmativas definitivas a respeito de aplicar em camadas de impermeabilização de base de aterros sanitários demandam um maior número de experimentos.

Referências

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Departamento de Transportes, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005. 145 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5084 – 16A**: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken, 2020. 24 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4186 - 89(1998)e1**: Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled Strain Loading. West Conshohocken, 1999. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4186 / D4186M-12**: Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading. West Conshohocken, 2012. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro, 1995b. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2000. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016b. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995a. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f. 9 p.

BARBOSA, H. M. S. **Intemperismo biogeoquímico e ciclagem de nitrogênio pela interação do líquen *Cladonia substellata* Vainio com granito e basalto**. 2014. 233 f. Tese (Doutorado em Geografia) Dep. de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

BASSO, J. B. **Transporte e retenção de K^+ , Cu^{2+} e Cl^- em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes**: procedimentos de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em colunas. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BIRKELAND, P. W. **Soils and geomorphology**. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1999. 430 p.

BISSANI, C.A.; GIASSON, E.; CAMARGO, F.A.O. Solos afetados por sais In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO F.A.O. (ed). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, p.265-275, 2004.

BLACKWELDER, E. The insolation hypothesis of rock weathering. **American Journal of Science**, v. 26, n. 152, p. 97-113, ago. 1933.

BOFF, F. E. **Avaliação do comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de Cu^{++} , K^+ e Cl^- em colunas de percolação**. 1999. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

BOSCOV, M. E. G. **Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos**. 1997. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaise de Curitiba, PR**. 2008. 577 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BRASIL. Projeto de lei no 2289, de 8 de julho de 2015. Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2015.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 1, n. 6, p. 425-438, set. 2017.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Étude du comportement mécanique d'une marne compactée**. 1985. 181 p. Thèse (Doctorat en Génie Civil) I.N.S.A., Toulouse, 1985.

CANESCHI, F. P. **Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente**. 2012. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E. D.; PASSOS, M. L. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. **Fuel**, v. 88, n. 4, p. 756-763, abr. 2009.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E. D.; PASSOS, M. L. Licor negro de eucalipto kraft proveniente de indústrias brasileiras: características químicas, físicas e seu processamento na unidade de recuperação. **Revista O papel**, p. 57-70, maio. 2006.

CASTRO, J. F. A. **Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, Chapter I: Environmental Protection Agency, Part 258: Criteria for Municipal Solid Waste Landfills. The Office of the Federal Register, **National Archives and Records Administration**, U.S. Printing Office, Washington D.C., 1991.

COOKE, R. U.; SMALLEY, I. J. Salt weathering in deserts. **Nature**, v. 220, p. 1226-1227, dez. 1968.

CRUZ, V. M. V. **Estudo do comportamento químico e físico do licor negro de eucalipto no processo de extração da lignina**. 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

CUNHA; J. C.; RUIZ, H. A.; FREIRE, M. B. G. S; ALVAREZ, V. H.; FERNANDES, R. B. A. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1162-1169, 2014.

D'ÁLMEIDA, M. L. O.; KOGA, M. E. T.; FERREIRA, D. C.; PIGOZZO, R. J. B. Composição química da madeira e matérias-primas fibrosas. In: SENAI (SP). **Celulose**. São Paulo: SENAI, 2013. Cap.1, p.11-58. (Série Informações Tecnológicas: Área de Celulose e Papel).

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 623 p.

DELAVI, D. G. G. **Defloculação de suspensões aquosas de argila e sua correlação com caracterizações químicas e de superfície**. 2011. 126 p. Dissertação (Mestrado) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

EMPIE, H. J. **Fundamentals of the kraft recovery process**. Atlanta: Tappi Press, 2009. 199 p.

FAKHRAI, R. **Black Liquor Combustion in Kraft Recovery Boilers-Numerical Modelling**. 2002. Thesis (Doctor of Philosophy in Energy and Furnace Technology) Dep. of Material Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. 53 f.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA; E. **Química de suelos**: com ênfasis em suelos de América Latina. 2. ed. Turrialba: IICA, 1994. 420 p.

FAVARO, J. S. C. **Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2015. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

FELL, R.; FOSTER, M.; CYGANIEWICZ, J.; SILLS, G.; VROMAN, N.; DAVIDSON, R. **A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping**. Draft Guidance Document. jul. 2008.

FERRAZ, R. L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. 1994. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

FERREIRA, E. R. N. C. **Química e mineralogia de solos desenvolvidos de rochas alcalinas e ultrabásicas do domo de Lages, SC**. 2013. 161 p. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2013.

FERREIRA, R. C.; FREIRE, W. J. Propriedades físico-mecânicas de solos estabilizados com cimento e silicato de sódio avaliadas por meio de testes destrutivos e não-destrutivos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 221-232, 2003.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v.58, n.3, p.627-646, jul./set. 2001.

FONTES, M. P. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C. et al. (ed.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. cap. VI, p. 171–205.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT. **Forestry Production and Trade**, 2020. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> >. Acesso em: 01 fev. 2021.

FORTES, J. L. O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia, do Estado do Maranhão, na correção da acidez do solo**. 1993. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1993.

GLÓRIA, N. A. Uso agrônômico de resíduos. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 20, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992.

GOMES, C. F. S; MAIA, A. C. C. Ordenação de alternativas de biomassa utilizando o apoio multicritério à decisão. **Produção**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 488-499, jul./set. 2013.

GOOGLE MAPS. **Viçosa**. 2019. Disponível em: < <https://www.google.com/maps/place/Viçosa> >. Acesso em: 01 nov. 2020.

GOUDIE, A.; COOKE, R.; EVANS, I. Experimental investigation of rock weathering by salts. **Royal Geographical Society**, v. 2, n. 4, p. 42-48, 1970

HARRIS, D. C. **Quantitative chemical analysis**. 9. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2016. 792 p.

HOTZA, D. Colagem de Folhas Cerâmicas. **Cerâmica**, v. 43, n. 283-284, p. 157-164, 1997.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sydney: Butterworths, 1972. 374 p.

KACZMAREK, M. et al. Transport through a clay barrier with the contaminant concentration dependent permeability. **Transport in Porous Media**, v. 29, n. 2, p. 159-178, 1997.

KESSLER, D. W. **Physical and chemical tests on the commercial marbles of the United States**. Washington: US Department of Commerce, Bureau of Standards, 1919. 54 p.

KINJO, T. & MARCOS, Z.Z. Adsorção de sódio em alguns solos do Estado de São Paulo. II. Equilíbrio de troca catiônica entre sódio e cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 78-82, 1982.

KINJO, T.; SILVEIRA, R. I.; MARCOS, Z.Z.; ABRAHÃO I.O. Efeito da aplicação de efluente da fábrica de celulose junto com fosfogesso na correção da acidez do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 49, n. 1, p. 129-135, 1992.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering**, v. 32, n. 6, p. 488-492, 1954.

LAMBE, T.W. The Structured of Compacted Clays. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, v. 84, n. 2, p. 1654-1 to 1654-34, 1958.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia geral**. 14. ed. São Paulo: SP Nacional, 2001. 399 p.

LEITE, A. L. **Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular**. 2001. 254 f. Tese (Doutor em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEITE, J. C. **Estudos laboratoriais de percolação em colunas de misturas de solos lateríticos compactadas**: equipamentos e ensaios. 2000. 223 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEITE, J. C.; PARAGUASSÚ, A. B.; ZUQUETTE, L. V. An equipment for percolation test in soil columns. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4th, Lisboa, Portugal, 1998. **Anais...** v.1, p. 211-215.

LI, X.; ZHANG, L. M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, p. 129-141, 2009.

LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal**. 1981. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

LIMA, P. P. **Ensaio oedométrico com taxa de deslocamento constante em solos muito moles**. 1996. 110 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1996.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETER, J. L.; GOMES, F. J. B.; ANDRADE, M. F. Efeito dos sólidos dissolvidos da madeira no desempenho do processo kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 405-413, dez. 2009.

LOPERA, J. F. B. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. 2016. 149 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Dep. de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MCBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.

MCBRIDE, M. B. Surface Chemistry of Soil Minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.) **Minerals in Soil Environments**, 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap. 2, p 35-88.

MCGREEVY, J. P. Some perspectives on frost shattering. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 5, n. 1, p. 56-75, mar. 1981.

MELLO, J. W. V.; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. (ed.). **Química e mineralogia do solo**, Parte 1. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. cap. III, p. 151-249.

MELLOR, M. Phase composition of pore water in cold rocks. Corps of Engineers, US Army, **Cold Regions Research and Engineering Laboratory**, 1970.

MIKKANEN, P. **Fly ash particle formations in Kraft recovery boilers**. 2000. 69 f. Thesis (Doctor of Technology) Technical Research Centre of Finland, ESPOO, Finland, 2000.

MOURA, A. P. **Adensamento com velocidade controlada de deformação (CRS)**: desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios em solos moles do leste de Santa Catarina. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MURRAY, H. H. **Applied Clay Mineralogy**: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. 1. ed. Elsevier Science, 2008. 180 p. (Developments in Clay Science, v. 2)

NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado**. 2006. Tese de doutorado. 154 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

NONG, G.; ZHOU, Z.; WANG, S. Generation of hydrogen, lignin and sodium hydroxide from pulping black liquor by electrolysis. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 1, p. 13, 2016.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 195 p.

OLSON, K. R. Parent Material. In: HILLEL, D. (ed.) **Encyclopedia of Soils in the Environment**. 1. ed. Cambridge: Academic Press, 4, 2004. p. 532-535

PACHECO E SILVA, D. **Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners**. 2005. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PEIRCE, J. J.; SALLFORS, G.; MURRAY, L. Overburden pressures exerted on clay liners, **Journal of Environmental Engineering**, ASCE, v. 112, n. 2, p. 280-291, 1986.

PICCININI, C. A. **Estudo do comportamento eletroforético e reológico de argilas em meio aquoso para processamento eletroforético de barbotinas**. 2013. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 4, p. 391-400, abr. 2010.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com canadeaçúcar em vaso. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

QUEIROZ, B. P. **Estudo da permeabilidade de um solo estabilizado com subprodutos agroflorestais da madeira de pinus**. 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

REN, K. B.; KAGI, D. A. Upgrading the durability of mud bricks by impregnation. **Building and Environment**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 433-440, 1995.

RIBEIRO, R. A. V. **Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. 2002. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

ROCHA, R. R. **Estudo do comportamento reológico de suspensões argilosas da formação Corumbataí**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2 ed. New York: CRC Press, 2012. 657 p.

RUSSEL, E.W. **Soil conditions and plant growth**. 9. ed. Norwich, Longmans, 1961. 688 p.

SANTIAGO, L. O. R. **Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorfiçadas e filitos sericíticos da região do quadrilátero ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico**. 2008. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SILVA, C. P; **Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS): desenvolvimento de uma ferramenta para análise e interpretação dos resultados**. 2018. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SIXTA, H. (ed.). **Handbook of pulp**. 2 ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. 1 v. 1352 p.

SMITH, R. E.; WAHLS, H. E. Consolidation under constant rates of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v.95, n. 2, p. 519-539, 1969.

SOUZA, C. S. **Derivatização química e caracterização de uma lignina do bagaço da cana de açúcar**. 2006. 79 f. Dissertação (Mestrado em Química) Dep. de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 1.ed. Oxford: Oxford University Press, 1989. 277 p.

STUMM, W. **Chemistry of the solid-water interface**. New York: John Wiley and Sons, 1992. 428p.

TERRA, H. Discussion and communication: E. Blackwelder's challenge of the insolation hypothesis of rock weathering. **American Journal of Science**, v. 26, n. 156, p. 523-524, ago. 1933.

TESSENS, E.; ZAUYAH, S. Positive permanent charge in Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.1103-1106, 1982.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEXEIRA, W. et al. (org.) **Decifrando a Terra**. 1. ed. São Paulo Oficina de Textos, 2009. Cap. 8, p. 139-166

TUTUS, A.; ATEŞ, S.; DENİZ, I. Pulp and paper production from Spruce wood with kraft and modified kraft methods. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n.11, p. 1648-1654, 2010.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I. theory. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 40, n. 2, p. 250-252, 1980.

VELTEN, R. Z. Condutividade eletrosmótica e remediação de solos contaminados com cádmio via eletrosmose. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

VIEIRA, S. V. **Estabilização de solos com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários**. 1994. 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Dep. de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

VIEIRA, S. V.; MACHADO, C. C.; BUENO, B. S.; SOUZA, A. P. Estabilização de solos residuais com licor negro kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19. n. 1, p. 110-117, 1995a.

VIEIRA, S. V.; MACHADO, C. C.; BUENO, B. S.; SOUZA, A. P. Estudo do comportamento de algumas características de solos residuais com licor negro kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19. n. 1, p. 118-125, 1995b.

WEBER, R. C. **Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Dep. de Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. Harlow: Pearson, 2017. 1104 p.

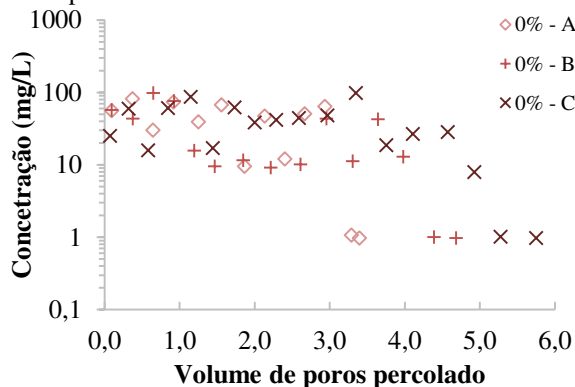
WISSA, A. E. Z.; CHRISTIAN, J.T.; DAVIS, E. H.; HEIBERG, S. Consolidation at constant rate of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v.97, n. 10, p. 1393-1413, 1971.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Variação das concentrações de Na, K, Mg, Ca, Al e Si presentes no percolado dos ensaios de permeabilidade

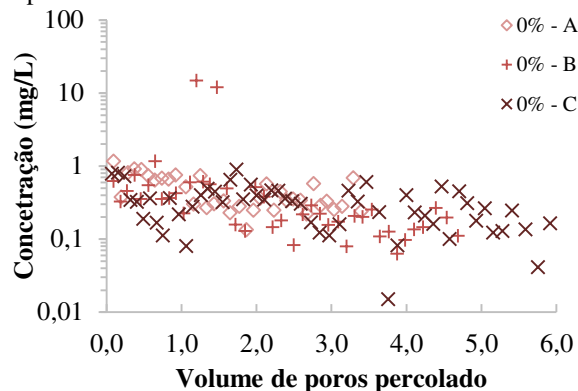
A.1 Concentração nos corpos de prova do solo natural

GRÁFICO A.1 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



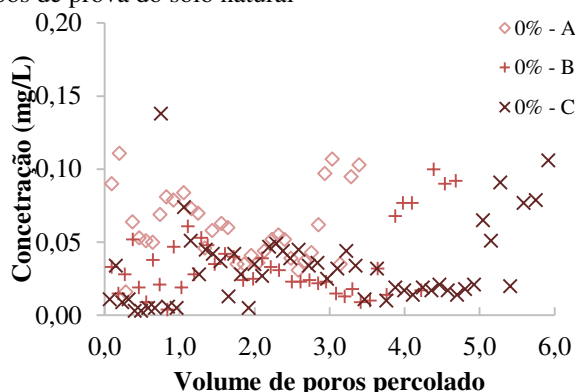
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.2 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



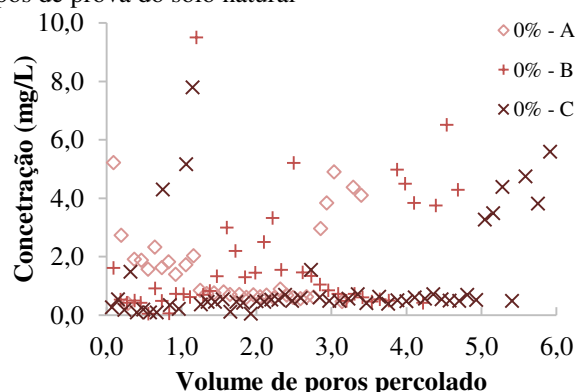
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.3 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



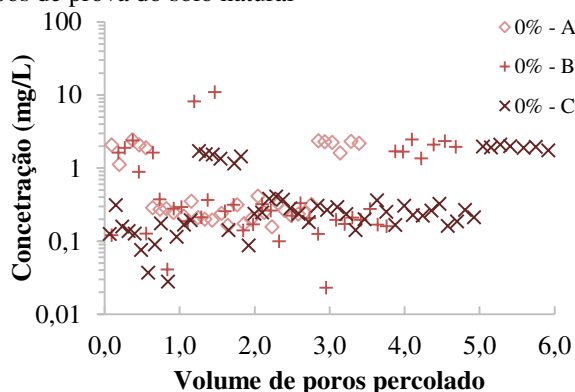
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.4 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



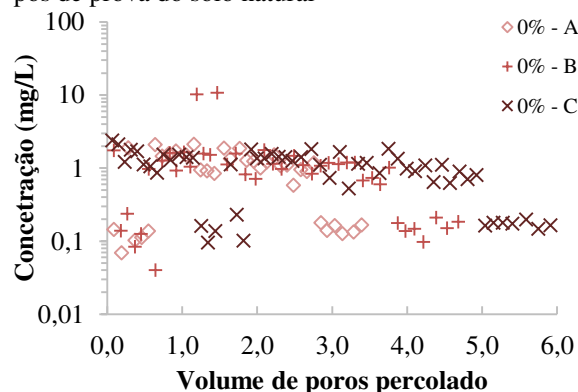
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.5 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

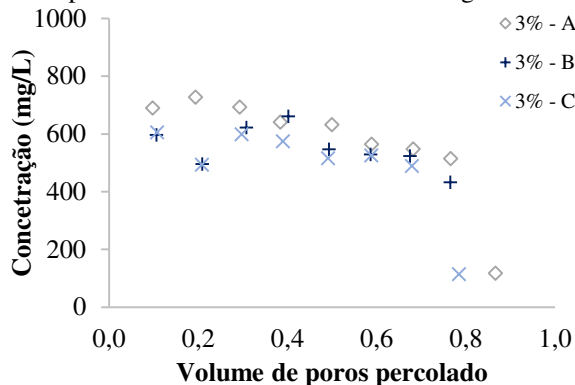
GRÁFICO A.6 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova do solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

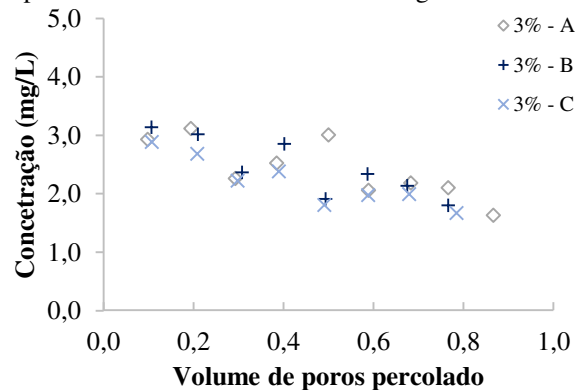
A.2 Concentração nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro

GRÁFICO A.7 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



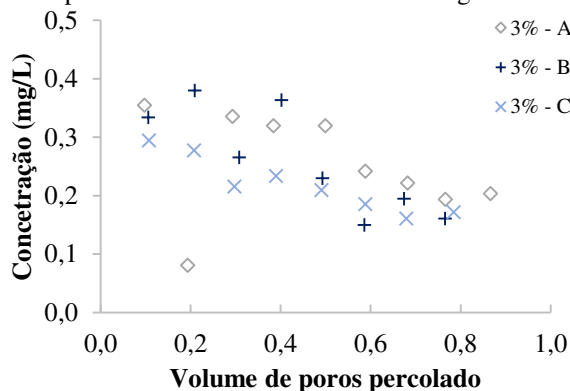
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.8 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



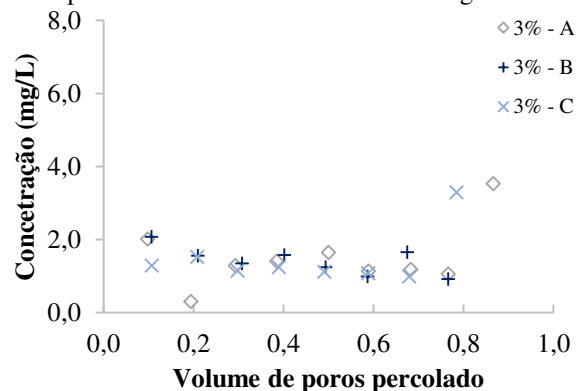
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.9 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



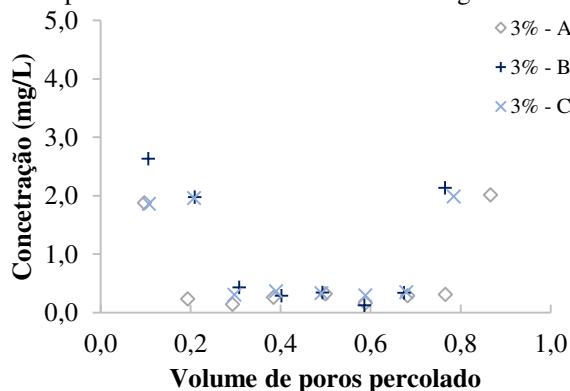
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.10 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



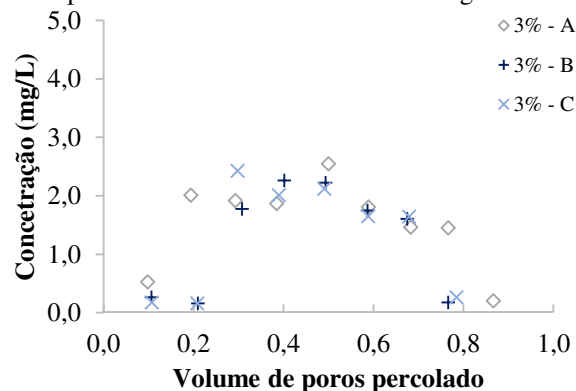
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.11 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

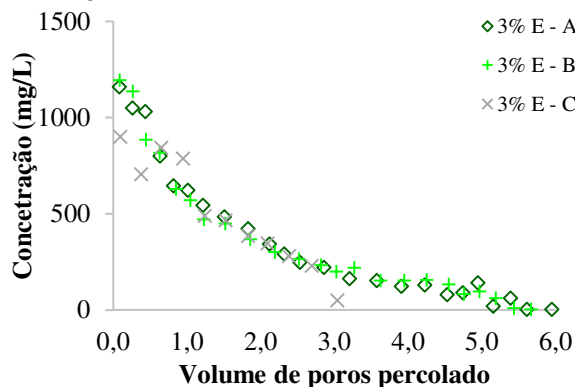
GRÁFICO A.12 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

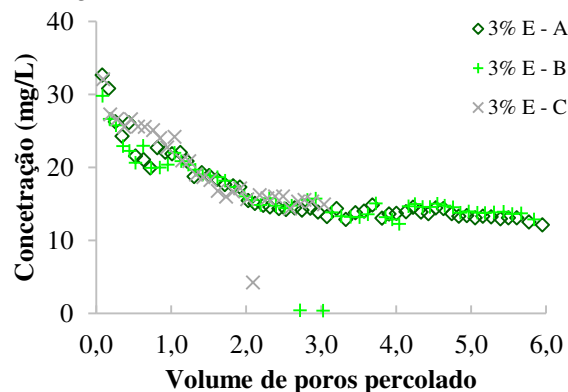
A.3 Concentração nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32

GRÁFICO A.13 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



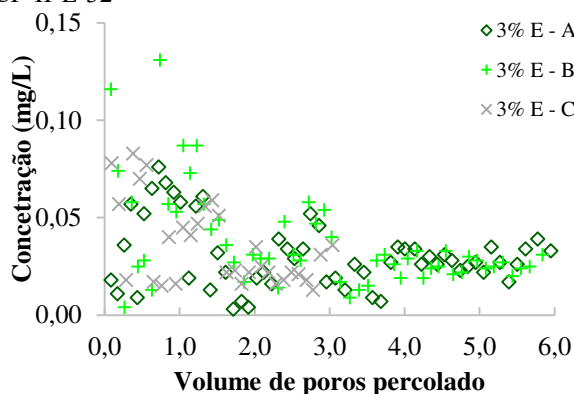
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.14 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



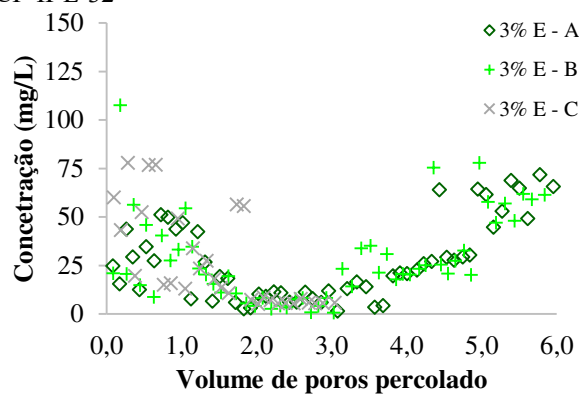
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.15 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



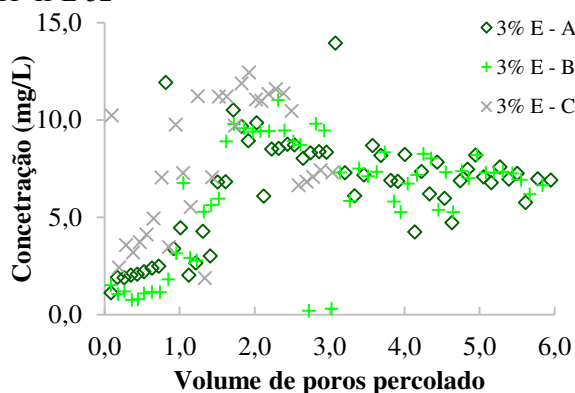
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.16 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



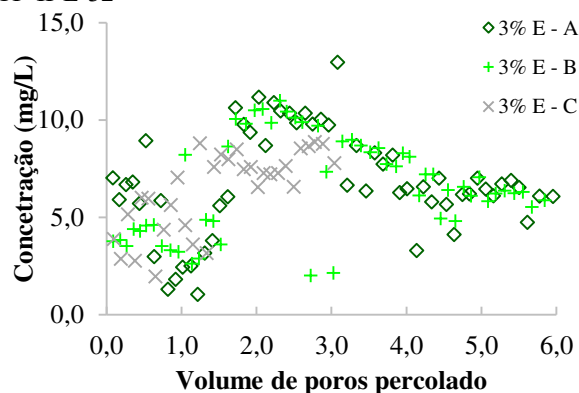
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.17 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

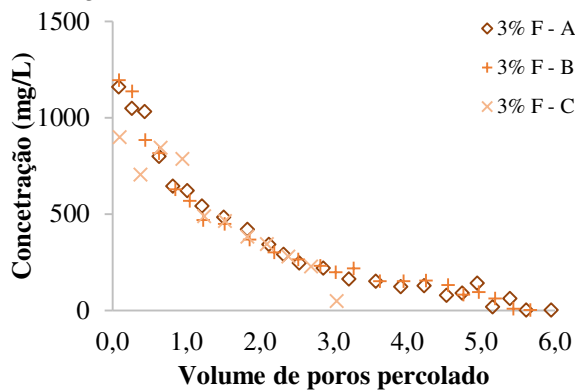
GRÁFICO A.18 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

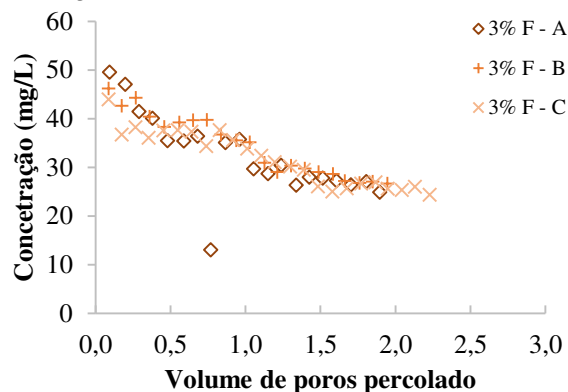
A.4 Concentração nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32

GRÁFICO A.19 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



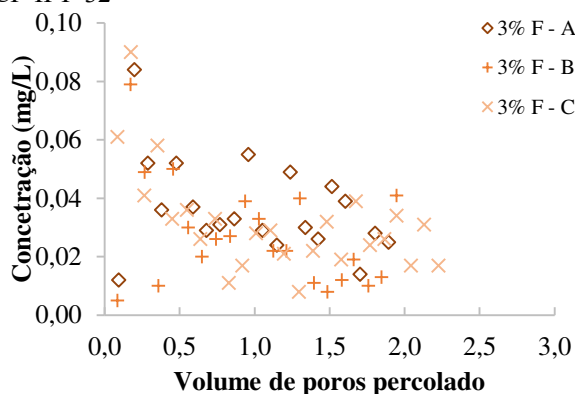
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.20 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



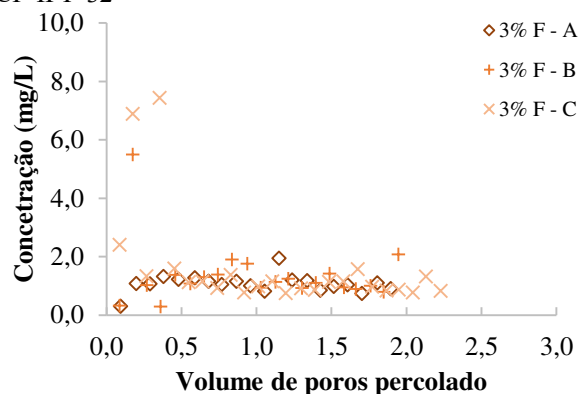
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.21 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



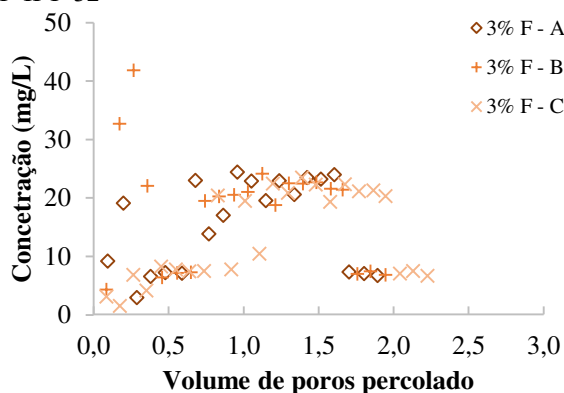
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.22 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



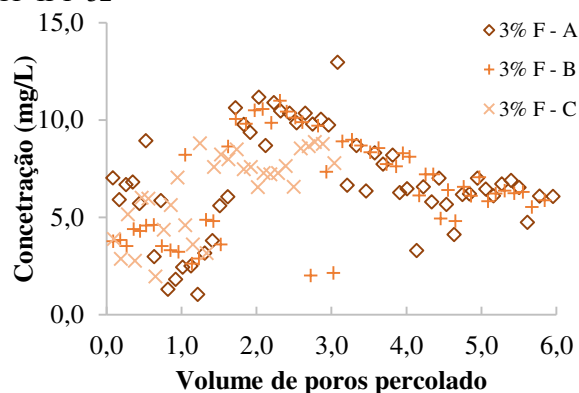
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.23 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

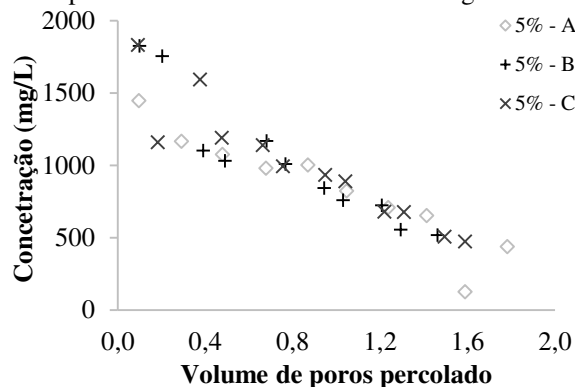
GRÁFICO A.24 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

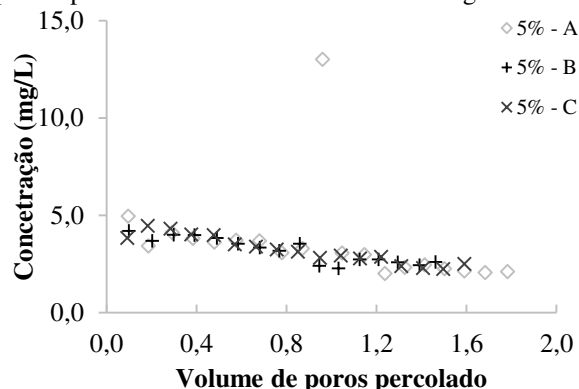
A.5 Concentração nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro

GRÁFICO A.25 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



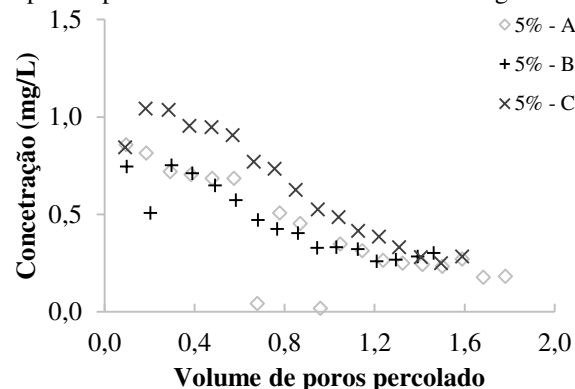
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.26 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



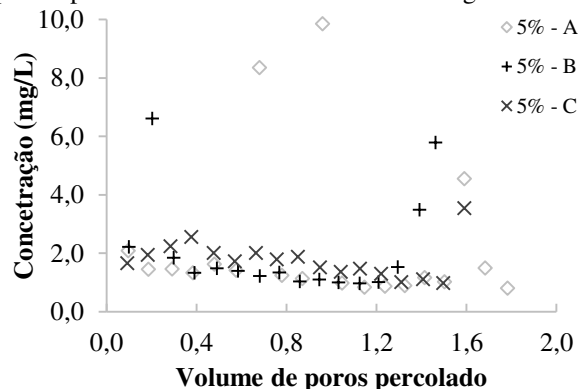
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.27 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



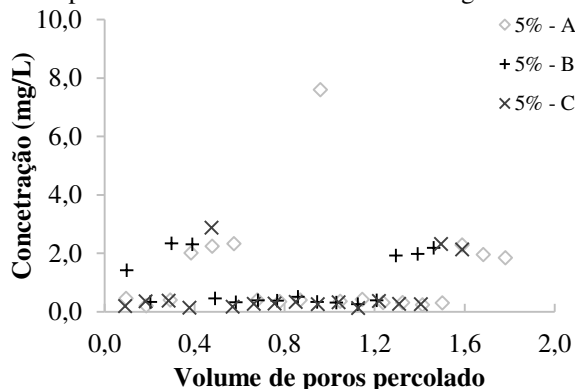
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.28 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



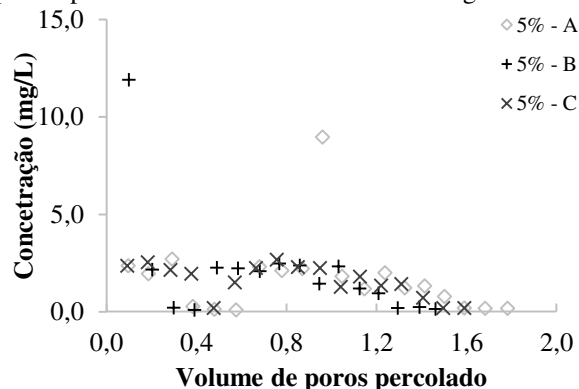
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.29 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

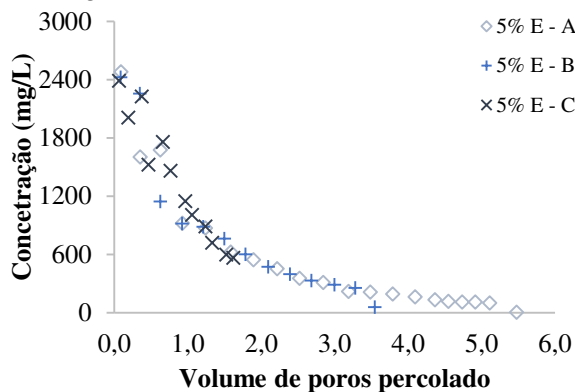
GRÁFICO A.30 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

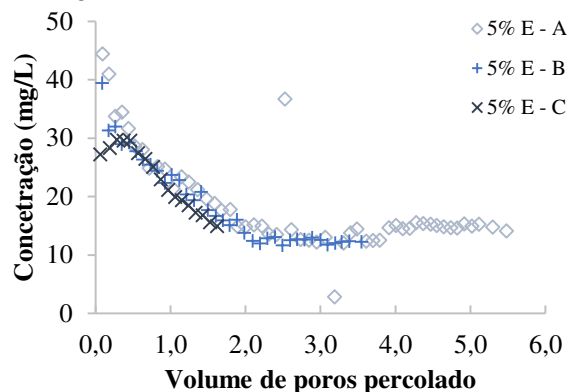
A.6 Concentração nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32

GRÁFICO A.31 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



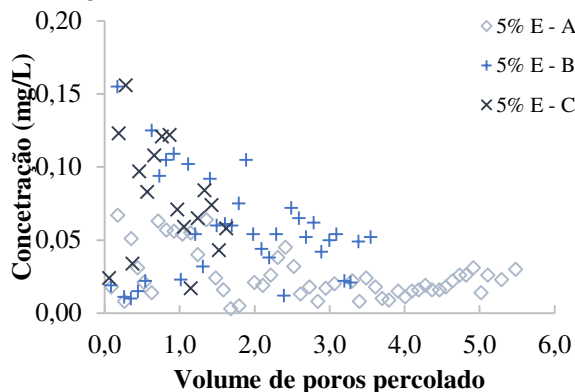
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.32 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



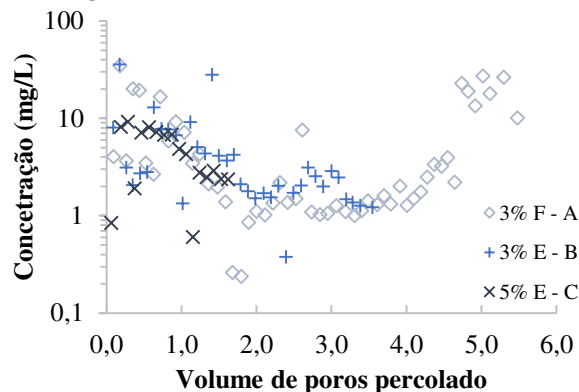
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.33 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



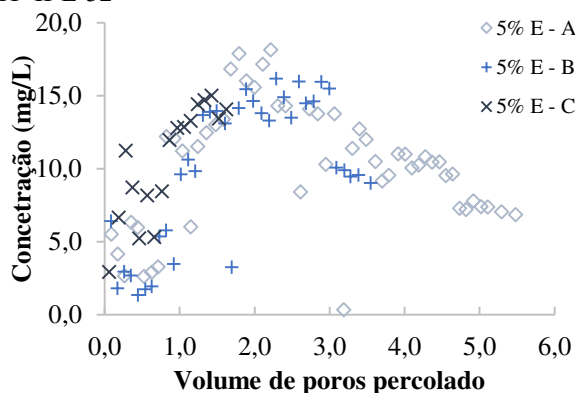
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.34 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



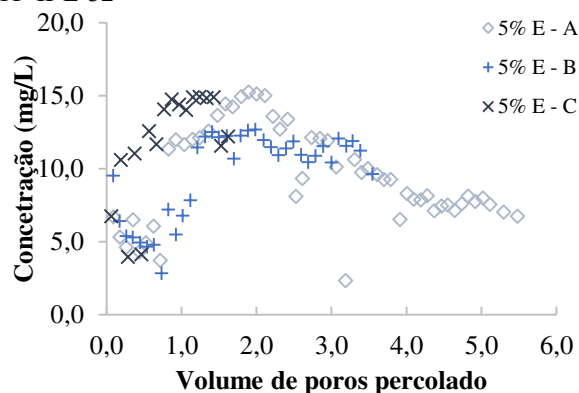
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.35 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

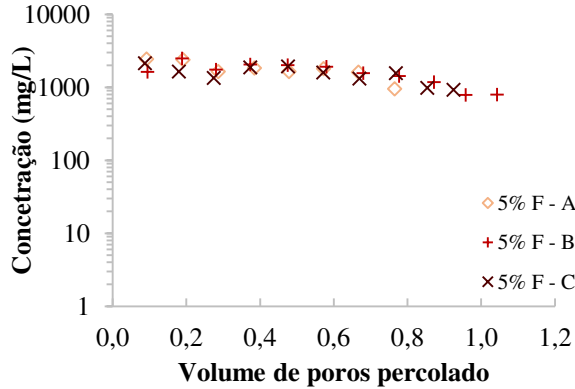
GRÁFICO A.36 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

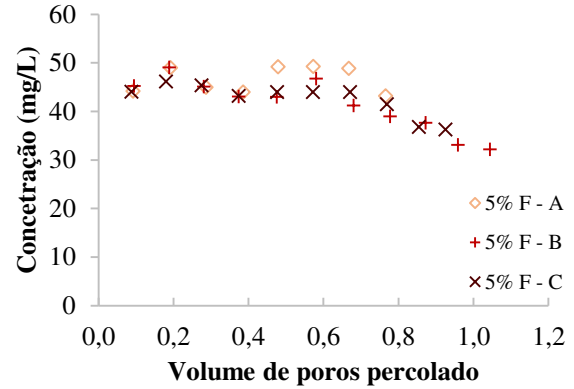
A.7 Concentração nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32

GRÁFICO A.37 – Concentração de Na (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32



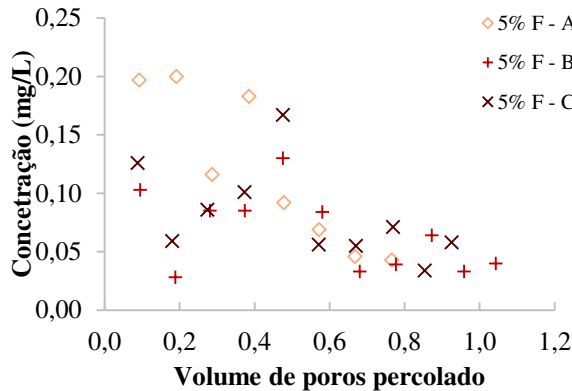
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.38 – Concentração de K (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32



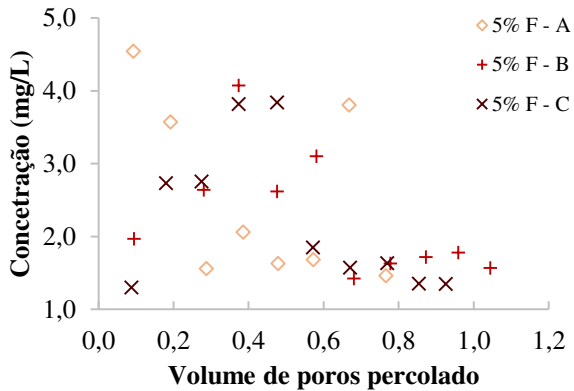
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.39 – Concentração de Mg (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32



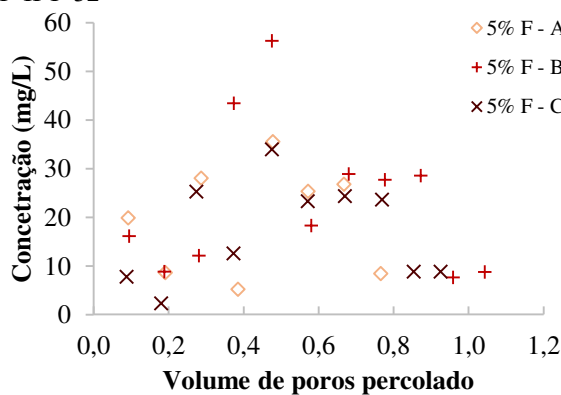
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.40 – Concentração de Ca (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32



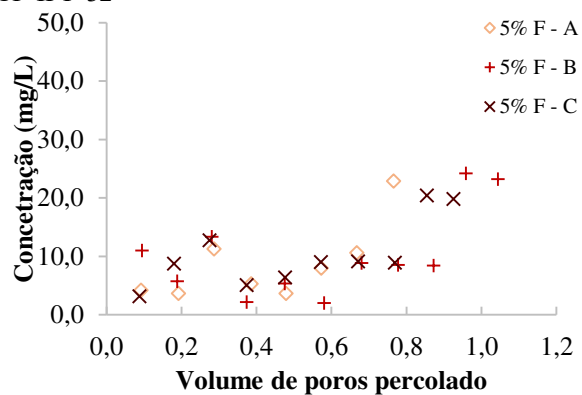
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.41 – Concentração de Al (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO A.42 – Concentração de Si (mg/L) nos corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32

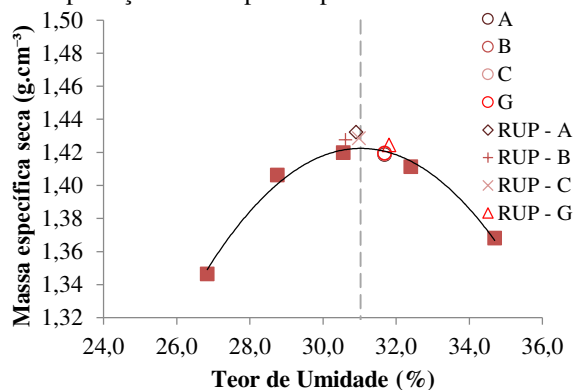


Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

B.1 Solo natural: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.1 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



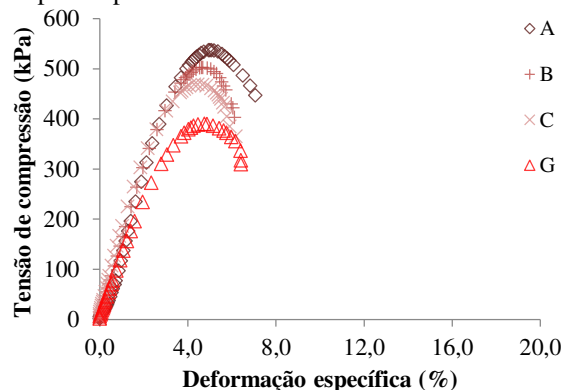
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.1 – 1º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.2 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.1 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural

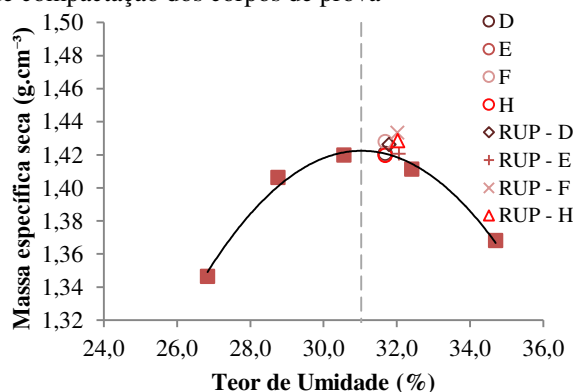
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,419	1,432	31,68	30,91	537,59	5,00
B	1,420	1,428	31,68	30,61	502,94	4,68
C	1,419	1,429	31,68	30,99	469,20	4,29
G	1,420	1,425	31,68	31,80	390,30	4,75

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

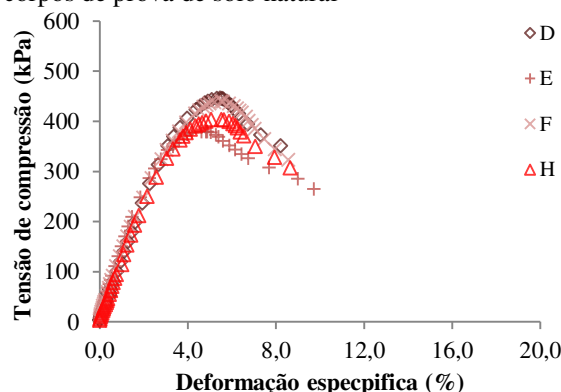
B.2 Solo natural: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.3 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.4 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.2 – 2º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.2 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural

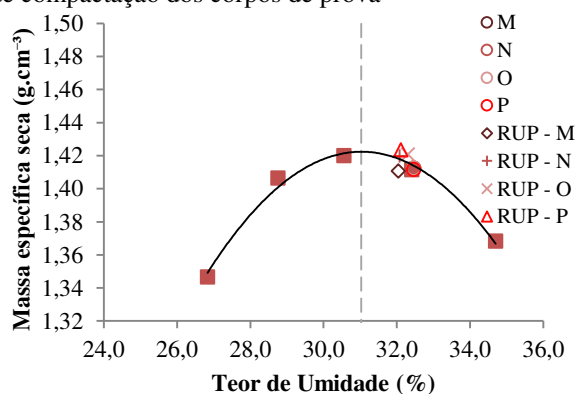
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,421	1,426	31,68	31,78	446,55	5,47
E	1,420	1,421	31,68	32,06	379,84	4,62
F	1,428	1,434	31,68	32,02	440,19	5,51
H	1,420	1,429	31,68	32,03	403,65	5,06

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm^3)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm^3)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

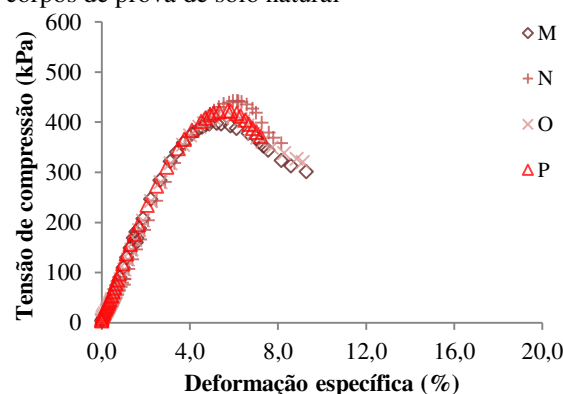
B.3 Solo natural: resultados do 3º lote (7 dias)

GRÁFICO B.5 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.6 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.3 – 3º lote de corpos de prova do solo natural na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.3 – Resultados de ensaio de compressão simples do solo natural

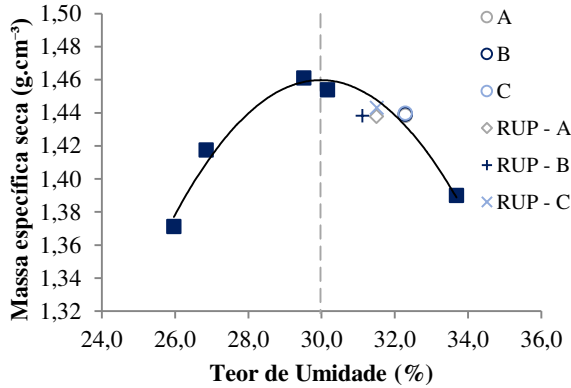
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
M	1,412	1,411	32,46	32,04	397,65	5,22
N	1,412	1,420	32,46	32,07	442,42	5,96
O	1,412	1,421	32,46	32,30	410,21	5,97
P	1,412	1,423	32,46	32,11	422,85	5,73

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm^3)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm^3)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

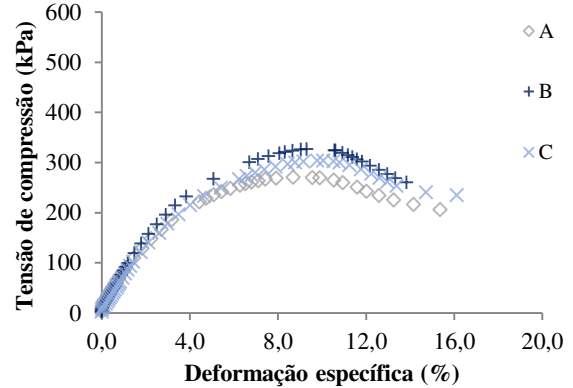
B.4 Mistura 3% de licor negro: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.7 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.8 – Resistência à compressão simples em corpos de prova da mistura 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.4 – 1º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.4 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro

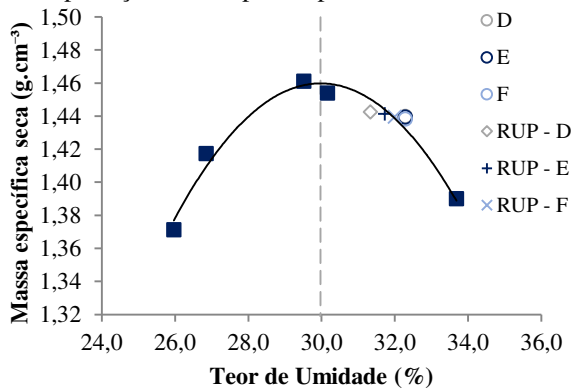
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,438	1,438	32,29	31,50	270,30	8,69
B	1,439	1,438	32,29	31,12	326,92	9,31
C	1,440	1,443	32,29	31,51	303,80	10,05

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

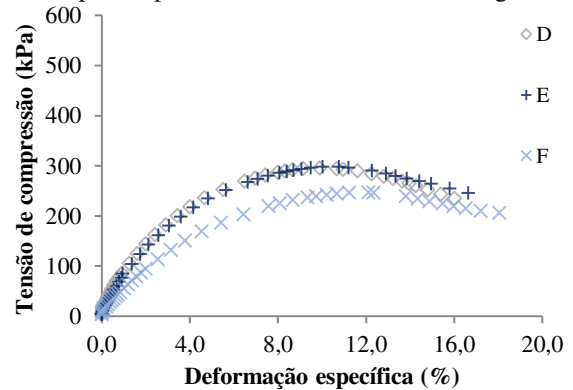
B.5 Mistura 3% de licor negro: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.9 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.10 – Resistência à compressão simples em corpos de prova da mistura 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.5 – 2º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.5 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro

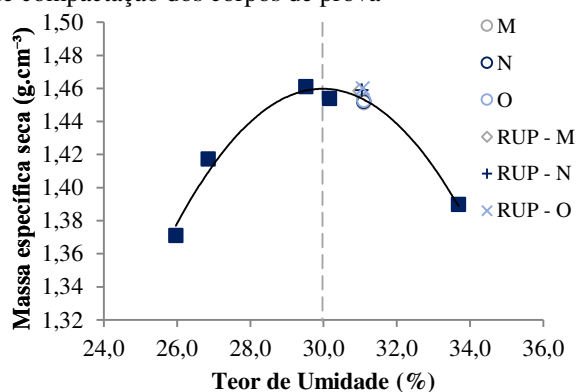
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,440	1,442	32,29	31,33	295,70	9,90
E	1,439	1,441	32,29	31,72	298,03	10,76
F	1,438	1,440	32,29	31,99	247,30	12,11

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

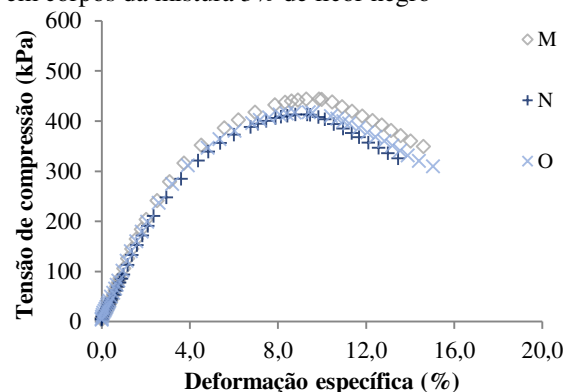
B.6 Mistura 3% de licor negro: resultados do 3º lote (7 dias)

GRÁFICO B.11 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.12 – Resistência à compressão simples em corpos da mistura 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.6 – 3º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.6 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro

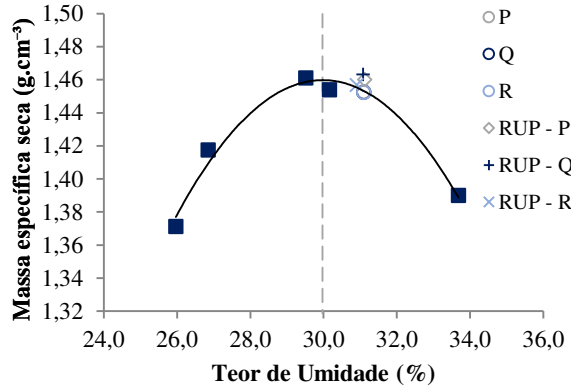
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
M	1,451	1,459	31,10	30,99	444,11	9,29
N	1,452	1,459	31,10	31,04	413,28	9,33
O	1,453	1,460	31,10	31,07	417,75	9,41

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

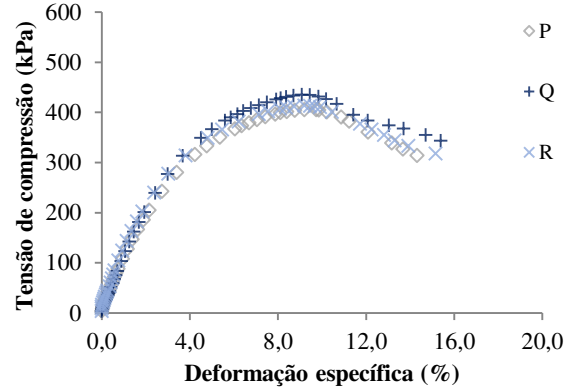
B.7 Mistura 3% de licor negro: resultados do 4º lote (28 dias)

GRÁFICO B.13 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.14 – Resistência à compressão simples em corpos da mistura 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.7 – 4º lote de corpos de prova da mistura 3% de licor negro na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.7 – Resultados de ensaio de compressão simples da mistura 3% de licor negro

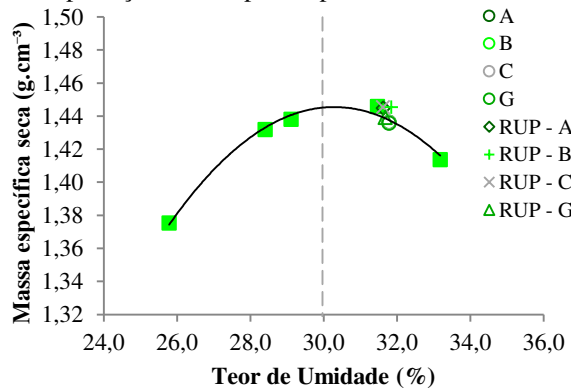
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
P	1,453	1,460	31,10	31,13	405,57	9,21
Q	1,452	1,463	31,10	31,08	435,06	9,09
R	1,452	1,457	31,10	30,91	413,46	9,21

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

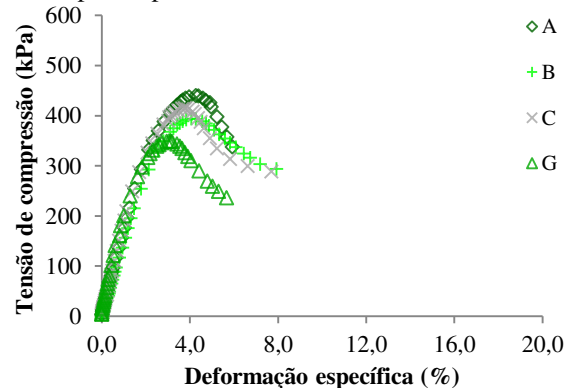
B.8 Mistura 3% de licor-cimento CP II-E-32: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.15 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.16 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.8 – 1º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.8 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-E-32

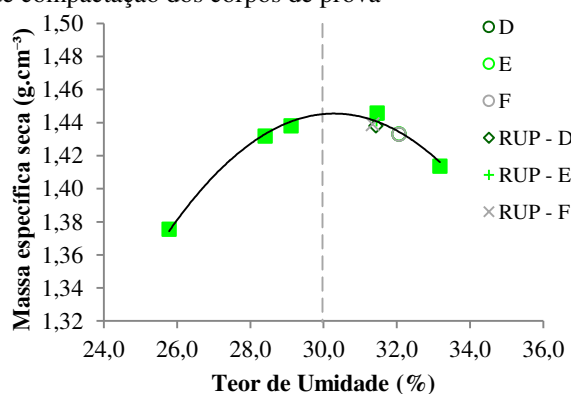
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,436	1,445	31,78	31,63	439,79	4,27
B	1,436	1,445	31,78	31,84	393,97	4,07
C	1,436	1,445	31,78	31,62	414,28	3,76
G	1,436	1,439	31,78	31,68	349,33	3,06

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

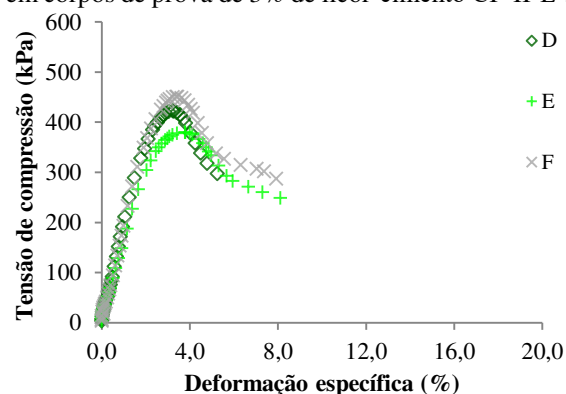
B.9 Mistura 3% de licor-cimento CP II-E-32: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.17 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.18 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.9 – 2º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.9 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-E-32

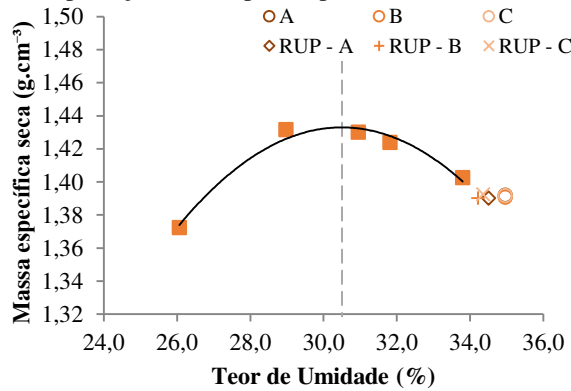
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,433	1,438	32,06	31,43	422,35	3,23
E	1,433	1,442	32,06	31,45	379,67	3,78
F	1,433	1,439	32,06	31,34	451,01	3,39

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

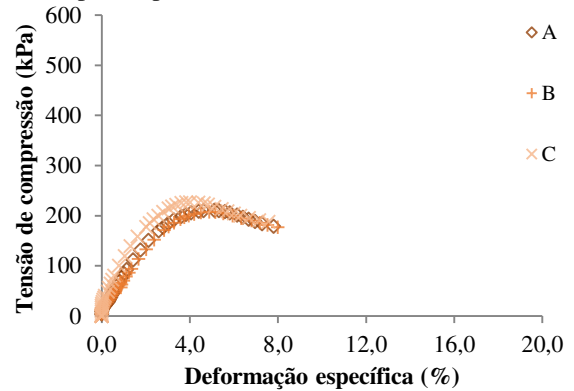
B.10 Mistura 3% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.19 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.20 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.10 – 1º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.10 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32

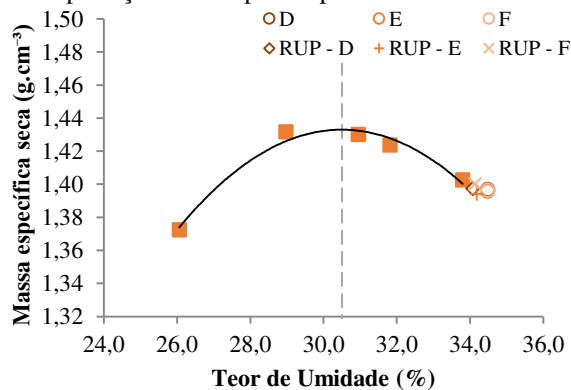
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,392	1,390	34,96	34,51	210,61	5,11
B	1,391	1,390	34,96	34,22	207,45	4,88
C	1,392	1,392	34,96	34,36	226,80	4,01

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

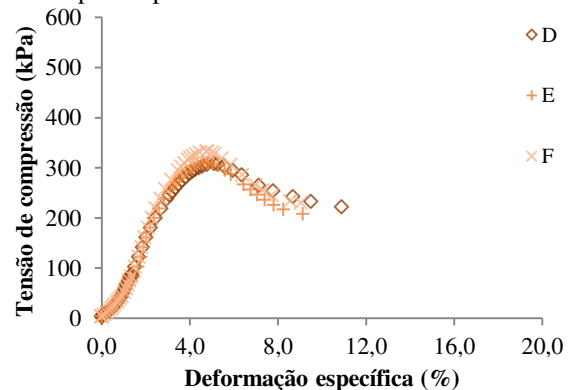
B.11 Mistura 3% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.21 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.22 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.11 – 2º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.11 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32

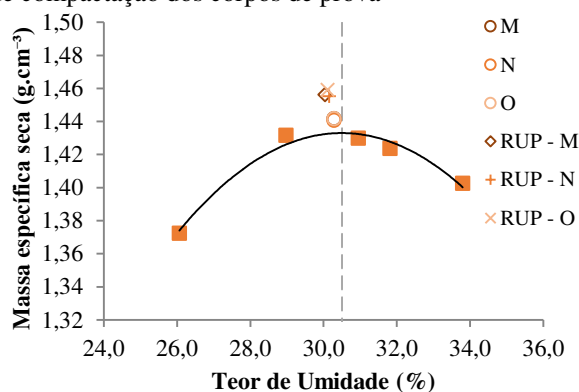
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,397	1,397	34,48	34,08	308,16	5,10
E	1,396	1,394	34,48	34,18	310,54	4,77
F	1,396	1,400	34,48	34,14	332,92	4,75

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

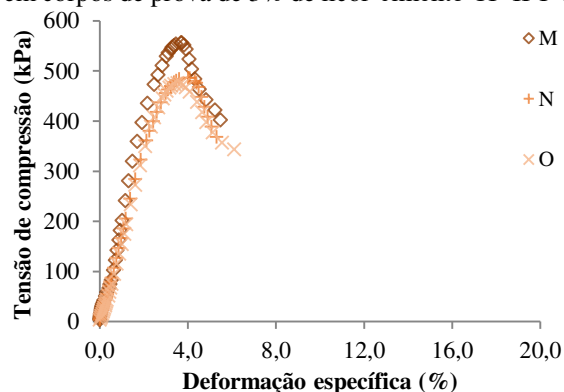
B.12 Mistura 3% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 3º lote (7 dias)

GRÁFICO B.23 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.24 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.12 – 3º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.12 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32

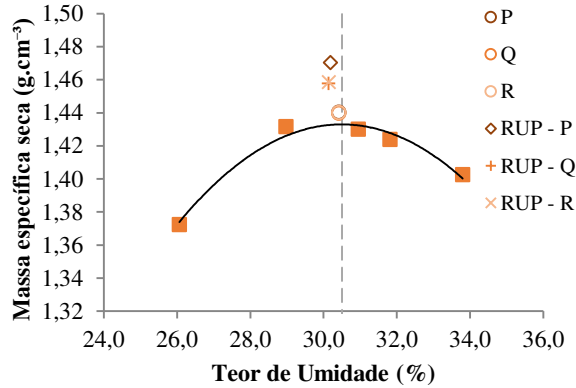
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
M	1,442	1,456	30,28	30,04	556,68	3,69
N	1,441	1,455	30,28	30,16	486,72	4,01
O	1,442	1,459	30,28	30,11	475,92	3,54

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

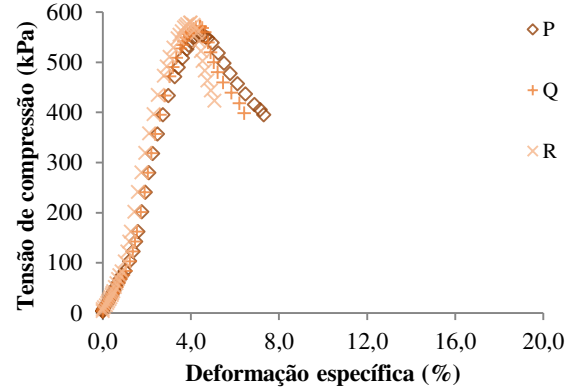
B.13 Mistura 3% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 4º lote (28 dias)

GRÁFICO B.25 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.26 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.13 – 4º lote de corpos de prova de 3% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.13 – Resultados de ensaio de compressão simples de 3% de licor-cimento CP II-F-32

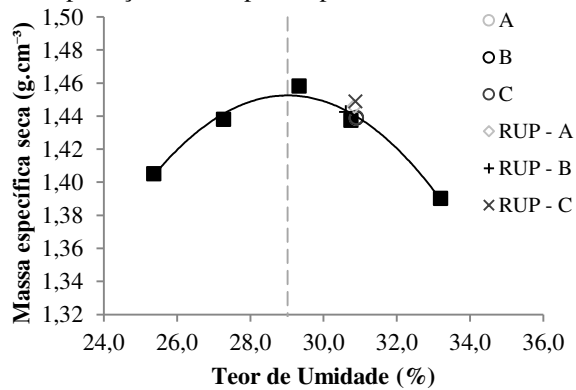
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
P	1,440	1,470	30,41	30,19	554,24	4,47
Q	1,440	1,458	30,41	30,13	571,39	4,40
R	1,440	1,458	30,41	30,15	579,16	3,97

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

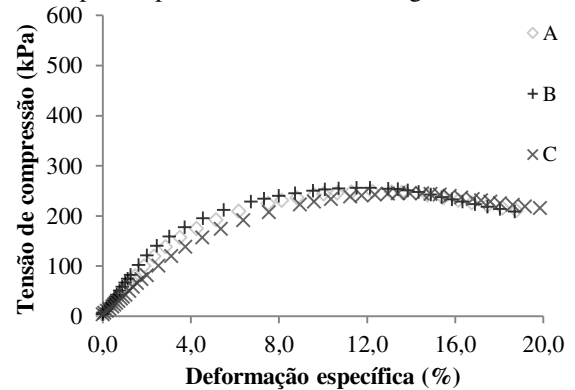
B.14 Mistura 5% de licor negro: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.27 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.28 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.14 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.14 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro

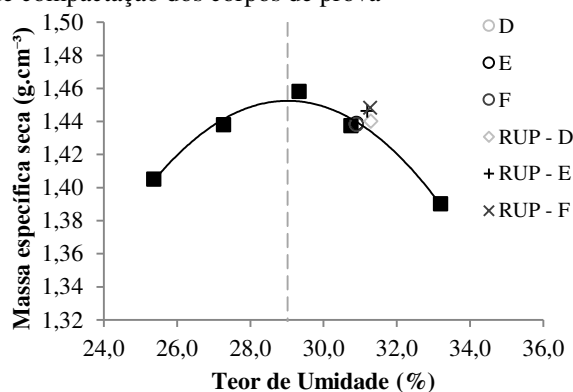
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,439	1,446	30,90	30,84	248,84	12,23
B	1,439	1,443	30,90	30,61	255,83	11,53
C	1,439	1,449	30,90	30,87	245,52	13,94

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm^3)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm^3)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

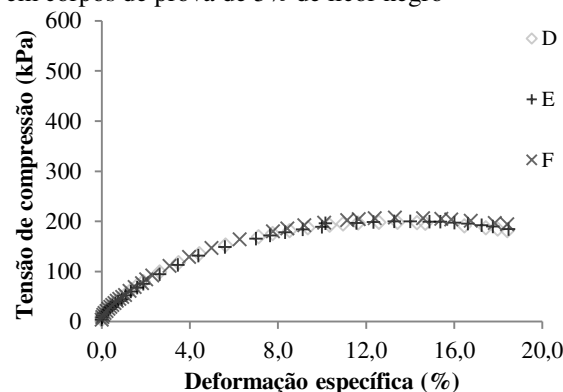
B.15 Mistura 5% de licor negro: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.29 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.30 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.15 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.15 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro

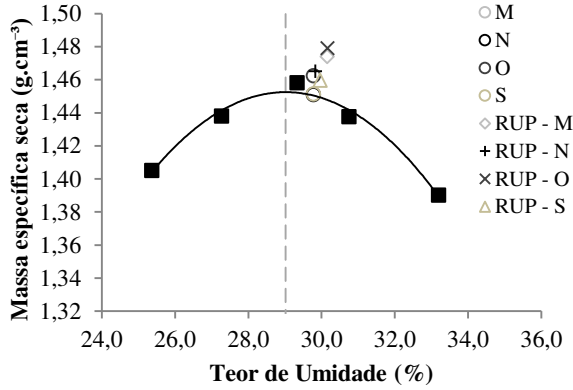
CP	ρ		w		q_u	ε
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,439	1,440	30,90	31,29	198,40	12,58
E	1,439	1,446	30,90	31,20	200,06	14,02
F	1,438	1,448	30,90	31,27	207,97	13,31

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm^3)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm^3)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ε Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

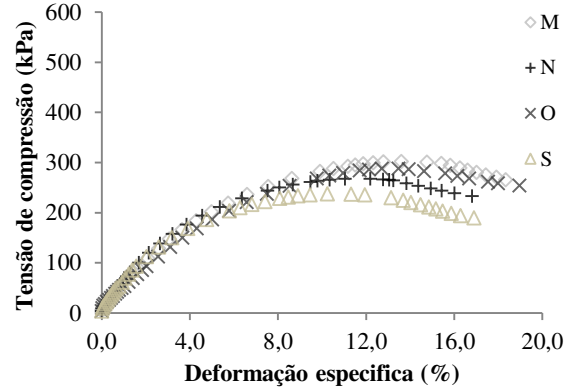
B.16 Mistura 5% de licor negro: resultados do 3º lote (7 dias)

GRÁFICO B.31 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.32 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.16 – 3º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.16 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro

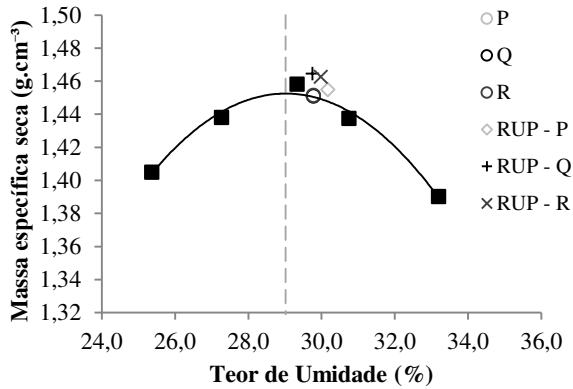
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
M	1,451	1,474	29,77	30,16	302,02	13,61
N	1,451	1,465	29,77	29,83	267,24	12,19
O	1,462	1,479	29,77	30,16	288,00	13,47
S	1,451	1,460	29,77	29,97	237,33	10,25

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

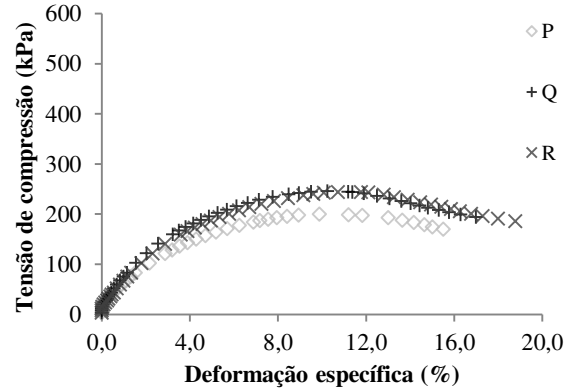
B.17 Mistura 5% de licor negro: resultados do 4º lote (28 dias)

GRÁFICO B.33 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.34 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.17 – 4º lote de corpos de prova de 5% de licor negro na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.17 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor negro

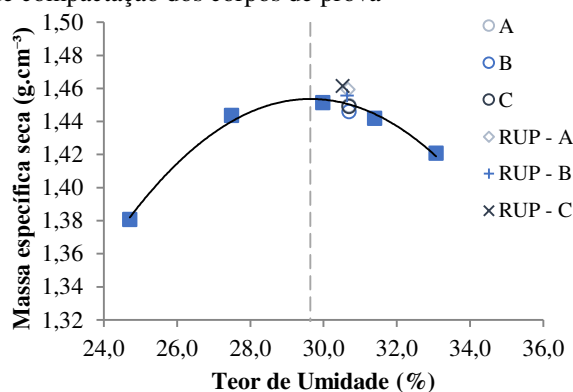
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
P	1,451	1,455	29,77	30,17	200,05	9,89
Q	1,451	1,465	29,77	29,76	246,39	10,25
R	1,451	1,463	29,77	29,98	244,61	10,72

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

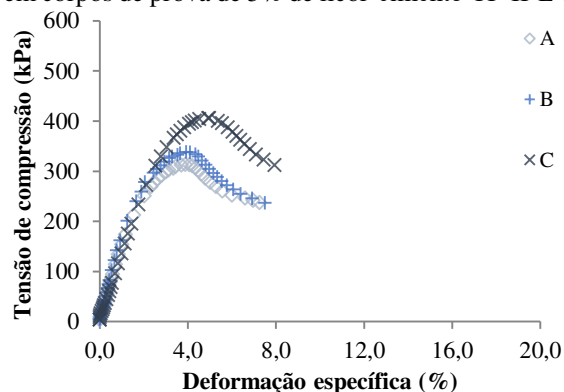
B.18 Mistura 5% de licor-cimento CP II-E-32: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.35 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.36 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.18 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.18 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-E-32

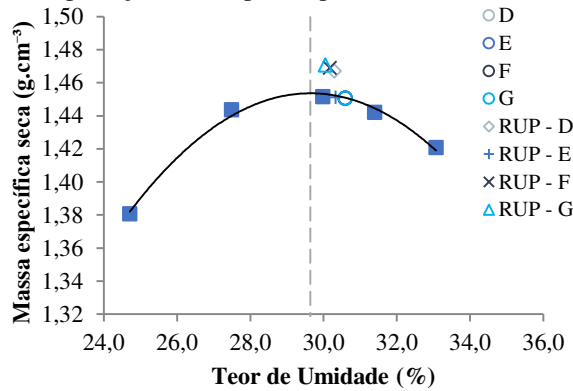
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,450	1,459	30,70	30,67	313,68	3,88
B	1,446	1,456	30,70	30,65	338,48	3,93
C	1,449	1,461	30,70	30,52	406,55	4,92

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

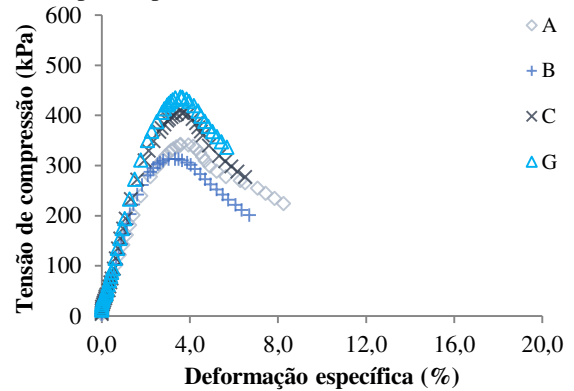
B.19 Mistura 5% de licor-cimento CP II-E-32: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.37 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.38 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.19 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-E-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.19 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-E-32

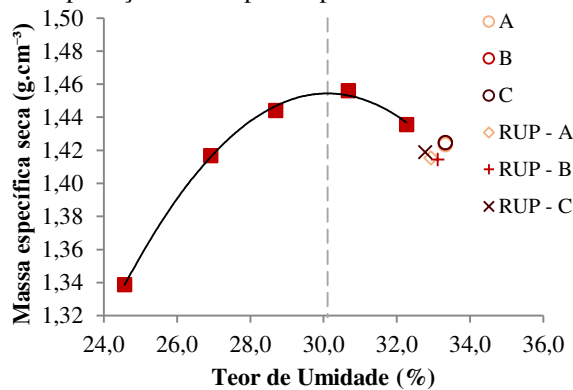
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,450	1,467	30,59	30,29	342,40	3,58
E	1,451	1,451	30,59	30,33	313,04	3,34
F	1,451	1,469	30,59	30,17	404,84	3,65
G	1,451	1,471	30,59	30,05	436,57	3,58

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

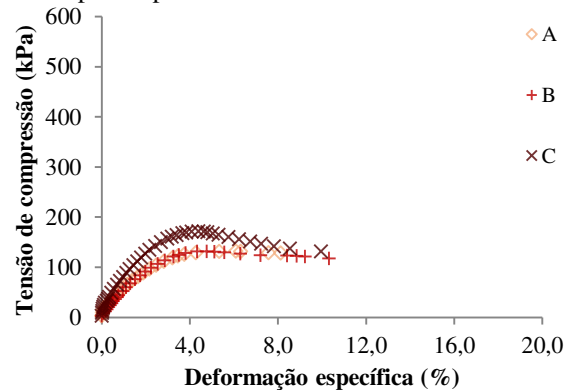
B.20 Mistura 5% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 1º lote (7 dias)

GRÁFICO B.39 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.40 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.20 – 1º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.20 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32

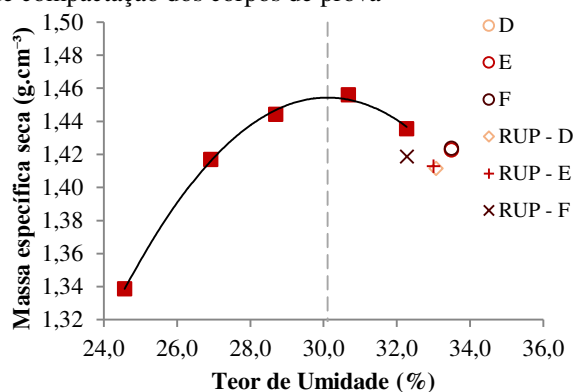
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
A	1,424	1,415	33,33	32,93	132,42	6,10
B	1,425	1,414	33,33	33,12	131,99	4,77
C	1,425	1,419	33,33	32,78	171,86	4,38

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

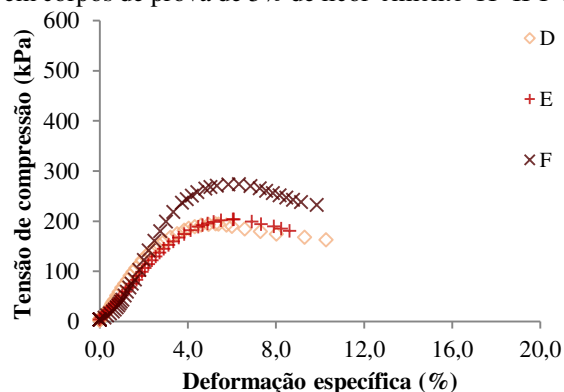
B.21 Mistura 5% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 2º lote (28 dias)

GRÁFICO B.41 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.42 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.21 – 2º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.21 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32

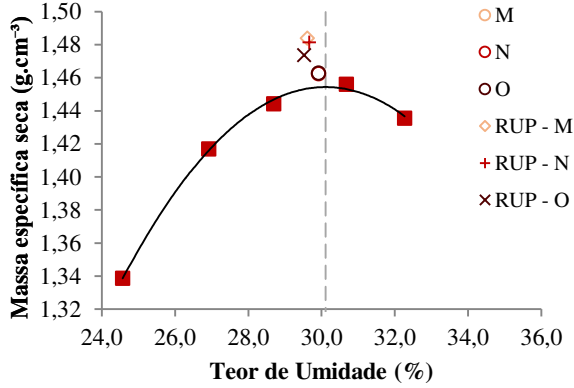
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
D	1,423	1,412	33,49	33,07	194,43	5,26
E	1,423	1,413	33,49	33,00	203,44	6,04
F	1,424	1,419	33,49	32,27	273,66	6,32

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

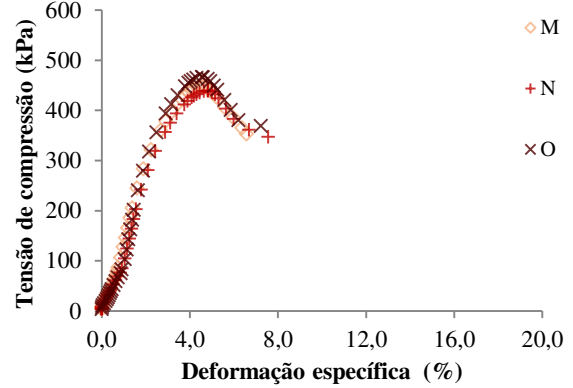
B.22 Mistura 5% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 3º lote (7 dias)

GRÁFICO B.43 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.44 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.22 – 3º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (7 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.22 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32

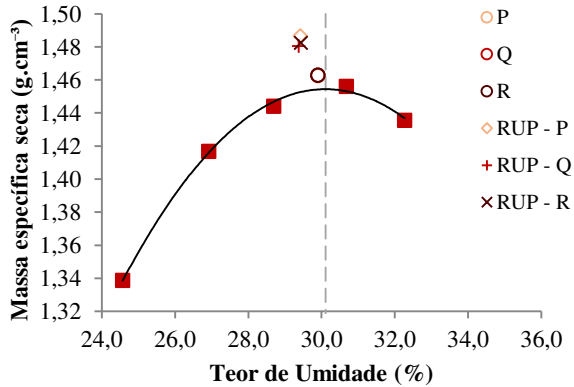
CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
M	1,463	1,484	29,92	29,61	446,99	4,56
N	1,462	1,481	29,92	29,67	439,25	4,81
O	1,463	1,474	29,92	29,53	466,49	4,55

ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

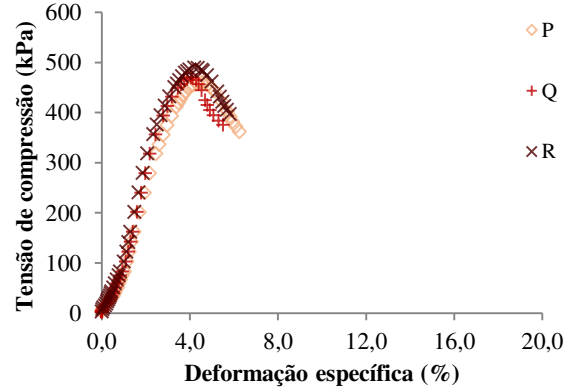
B.23 Mistura 5% de licor-cimento CP II-F-32: resultados do 4º lote (28 dias)

GRÁFICO B.45 – Curva de compactação e parâmetros de compactação dos corpos de prova



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO B.46 – Resistência à compressão simples em corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

FIGURA B.23 – 4º lote de corpos de prova de 5% de licor-cimento CP II-F-32 na ruptura (28 dias)



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

TABELA B.23 – Resultados de ensaio de compressão simples de 5% de licor-cimento CP II-F-32

CP	ρ		w		q_u	ϵ
	ρ_0	ρ_{rup}	w_0	w_{rup}		
P	1,463	1,487	29,90	29,42	460,18	4,53
Q	1,463	1,480	29,90	29,37	470,40	4,06
R	1,463	1,482	29,90	29,44	489,99	4,20

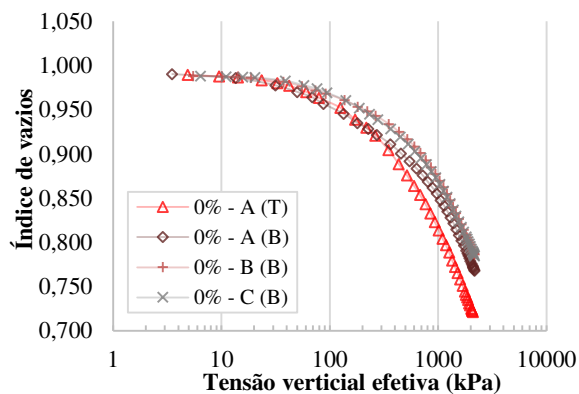
ρ_0 Massa específica seca aparente inicial (g/cm³)
 ρ_{rup} Massa específica seca aparente na ruptura (g/cm³)
 w_0 Teor de umidade na moldagem (%)
 w_{rup} Teor de umidade na ruptura (%)
 q_u Tensão de compressão máxima (kPa)
 ϵ Deformação específica na ruptura (%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de adensamento CRS

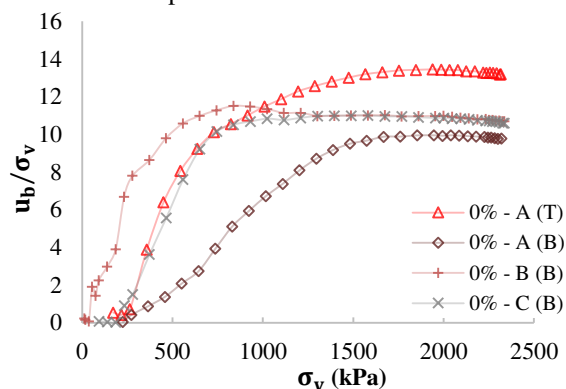
C.1 Ensaios em corpos de prova do solo natural

GRÁFICO C.1 – Curva de compressibilidade para solo natural



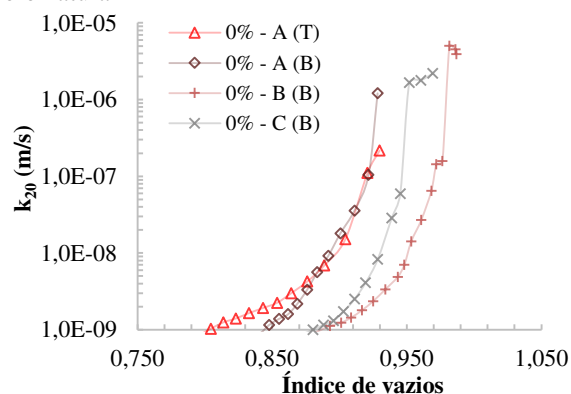
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.2 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para solo natural



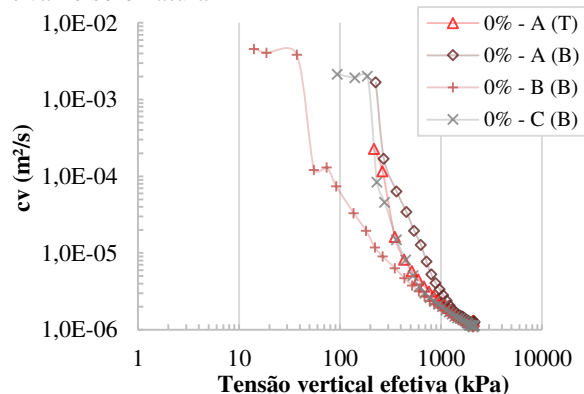
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.3 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios do solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

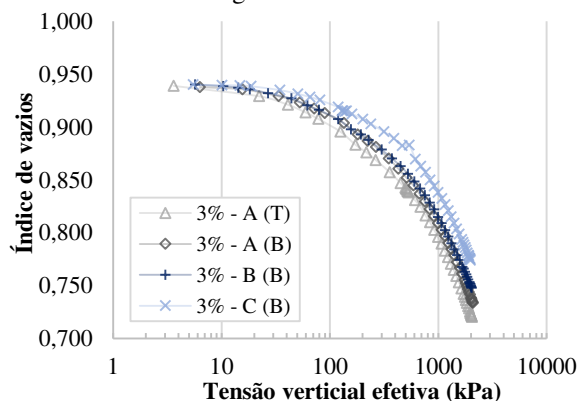
GRÁFICO C.4 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva no solo natural



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

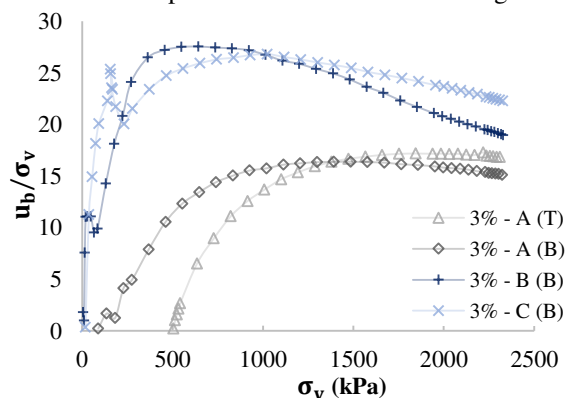
C.2 Ensaios em corpos de prova da mistura com 3% de licor negro

GRÁFICO C.5 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor negro



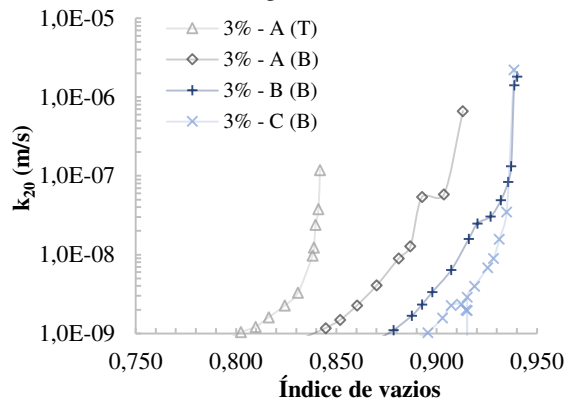
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.6 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para mistura de 3% de licor negro



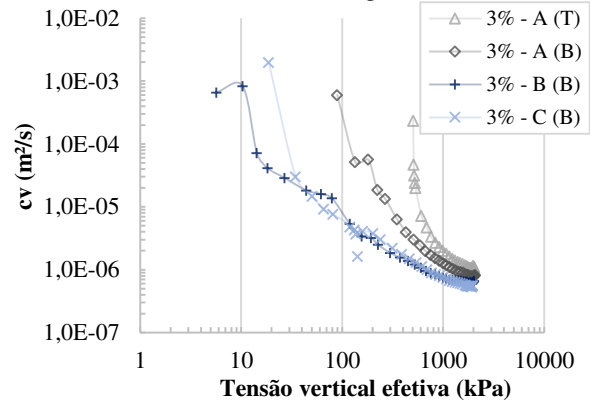
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.7 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

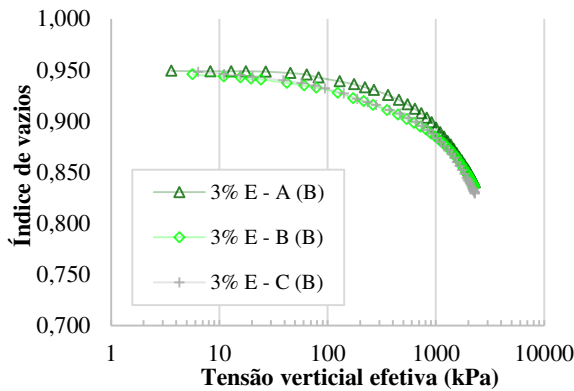
GRÁFICO C.8 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tenção vertical efetiva na mistura de 3% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

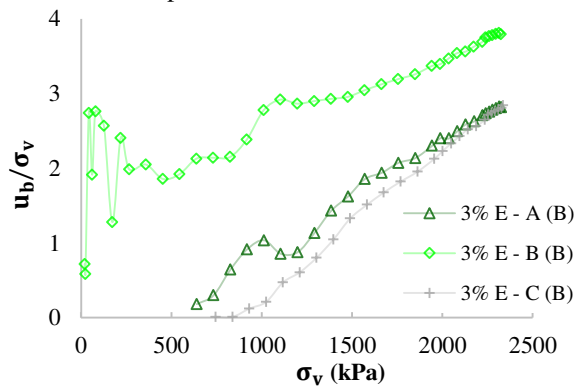
C.3 Ensaios em corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-E-32

GRÁFICO C.9 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32



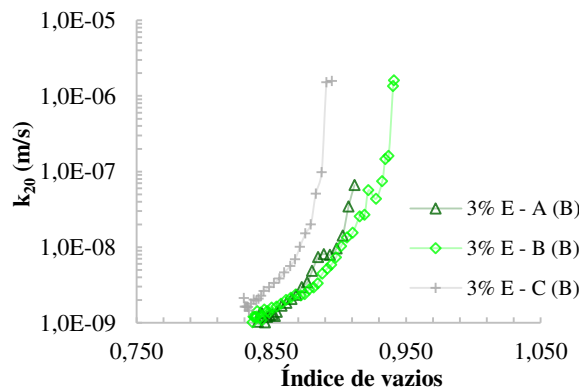
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.10 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 3% licor-cimento CP II-E-32



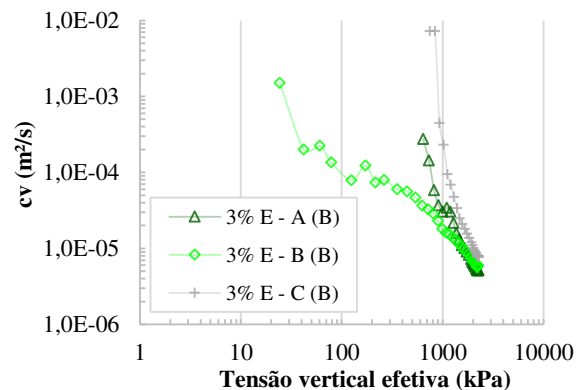
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.11 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

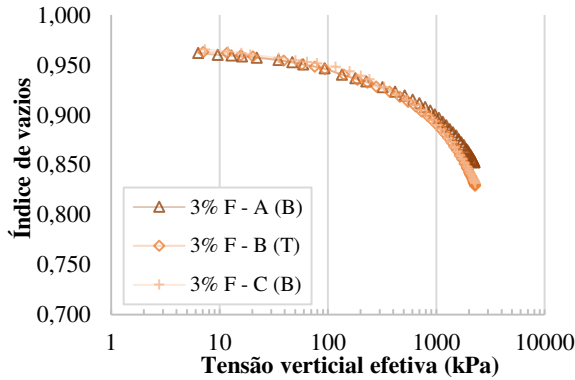
GRÁFICO C.12 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tenção vertical efetiva na mistura de 3% licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

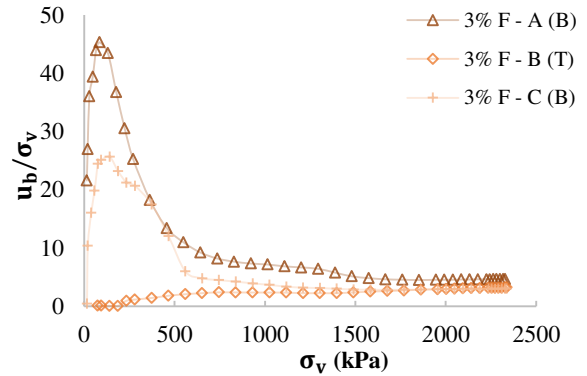
C.4 Ensaios em corpos de prova da mistura com 3% de licor-cimento CP II-F-32

GRÁFICO C.13 – Curva de compressibilidade para mistura de 3% de licor-cimento CP II-F-32



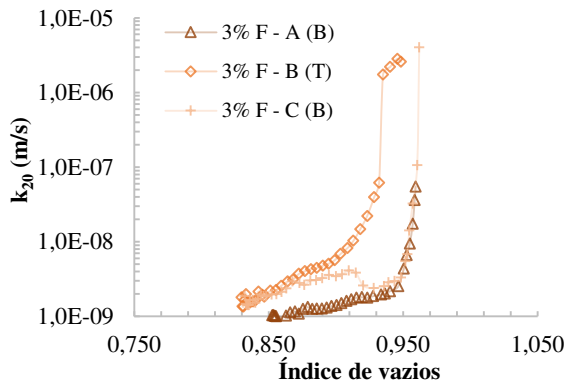
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.14 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 3% licor-cimento CP II-F-32



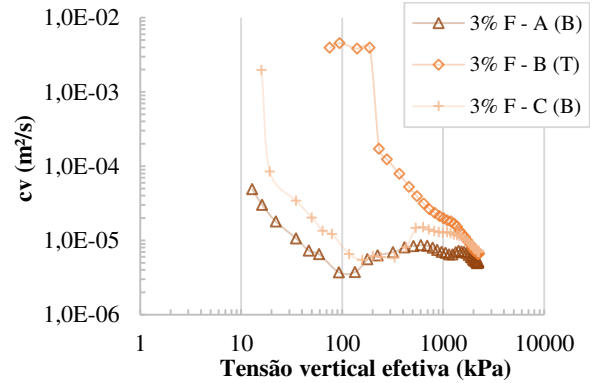
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.15 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 3% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

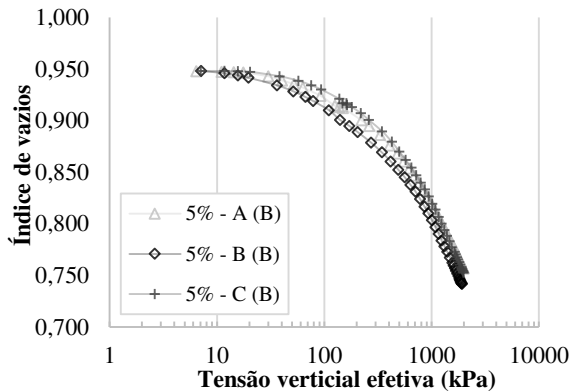
GRÁFICO C.16 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 3% licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

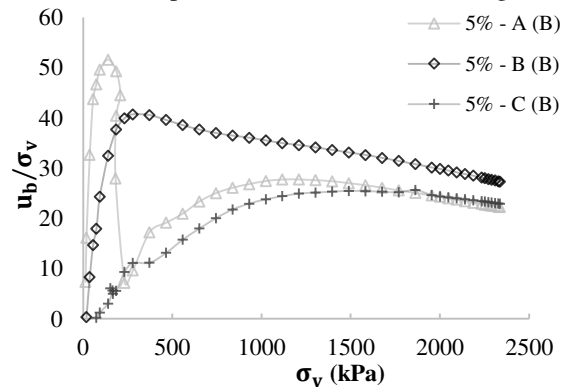
C.5 Ensaios em corpos de prova da mistura com 5% de licor negro

GRÁFICO C.17 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor negro



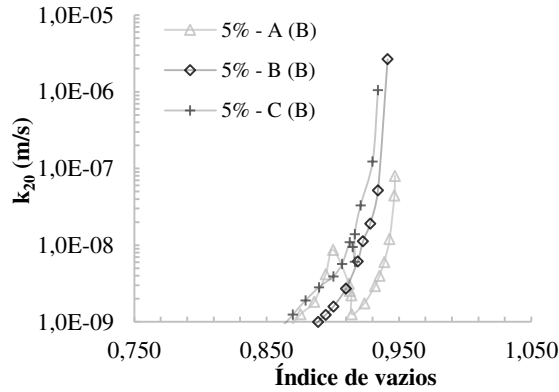
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.18 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para mistura de 5% de licor negro



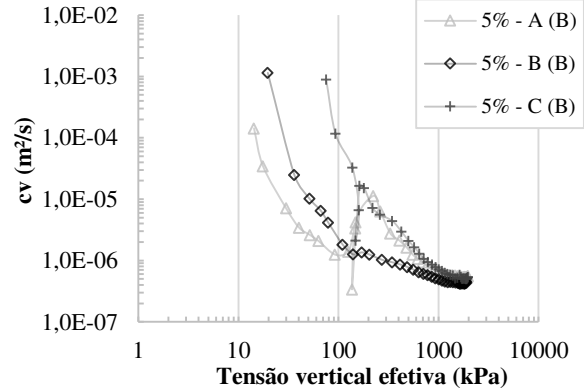
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.19 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

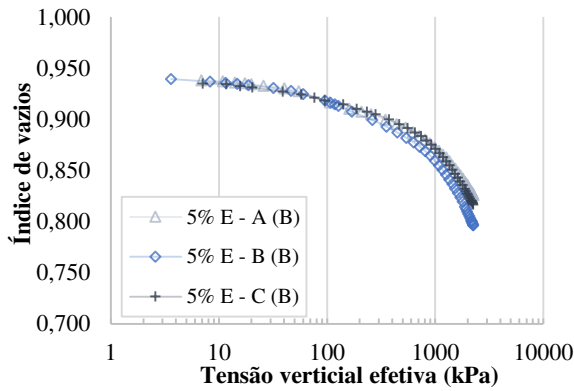
GRÁFICO C.20 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tenção vertical efetiva na mistura de 5% de licor negro



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

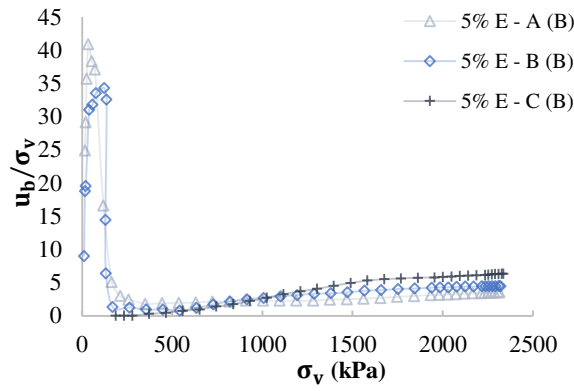
C.6 Ensaios em corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-E-32

GRÁFICO C.21 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32



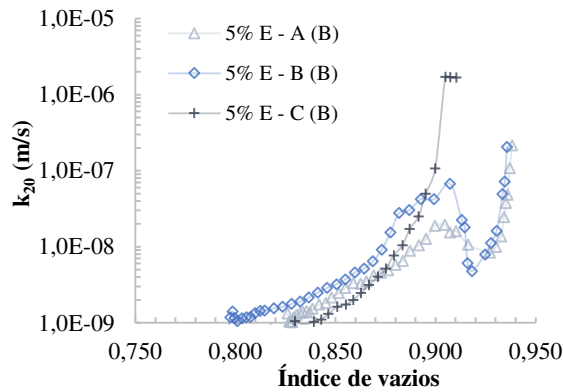
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.22 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 5% licor-cimento CP II-E-32



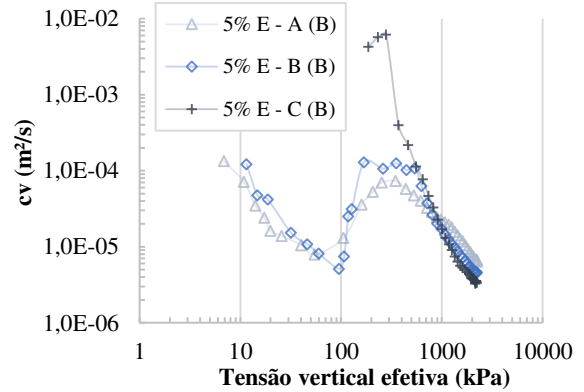
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.23 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

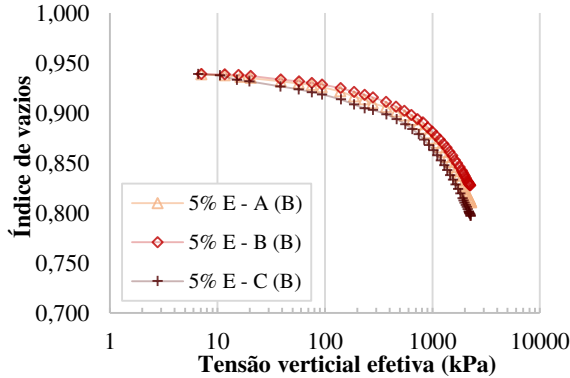
GRÁFICO C.24 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tenção vertical efetiva na mistura de 5% licor-cimento CP II-E-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

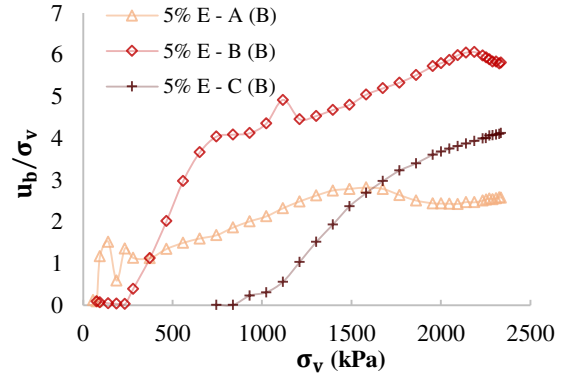
C.7 Ensaios em corpos de prova da mistura com 5% de licor-cimento CP II-F-32

GRÁFICO C.25 – Curva de compressibilidade para mistura de 5% de licor-cimento CP II-F-32



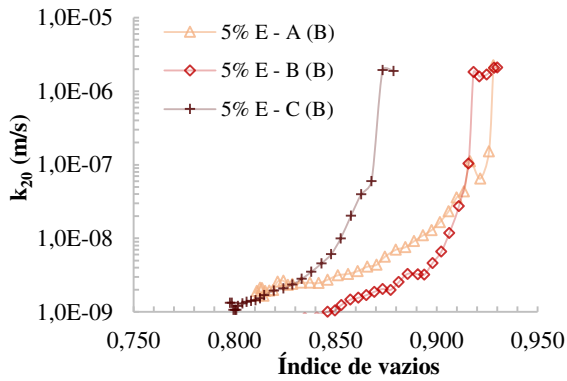
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.26 – Variação da razão u_b/σ_v em função da tensão axial para 5% licor-cimento CP II-F-32



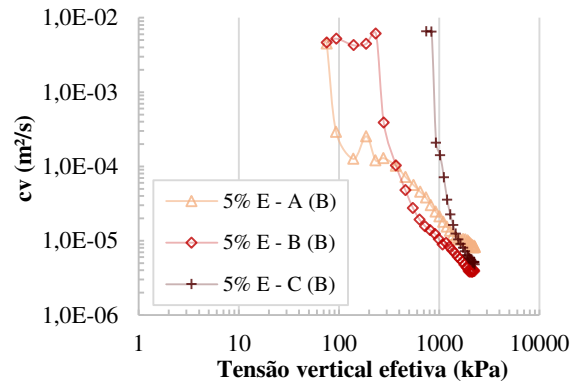
Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.27 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da redução do índice de vazios da mistura de 5% de licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.

GRÁFICO C.28 – Variação do coeficiente de adensamento em função do acréscimo de tensão vertical efetiva na mistura de 5% licor-cimento CP II-F-32



Fonte: elaborado pelo autor, 2021.