

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

ATURIÊ FELIPE MELO VERMOLLEN

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL EM PROPRIEDADES
DE RESISTÊNCIA DE UM SOLO TRATADO COM CIMENTO

Joinville

2021

ATURIÊ FELIPE MELO VERMOLLEN

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL EM PROPRIEDADES
DE RESISTÊNCIA DE UM SOLO TRATADO COM CIMENTO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Helena Paula Nierwinski

Joinville

2021

ATURIÊ FELIPE MELO VERMOLLEN

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LODO TÊXTIL EM PROPRIEDADES
DE RESISTÊNCIA DE UM SOLO TRATADO COM CIMENTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 22 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Helena Paula Nierwinski
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mestre Jonatas Sosnoski
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família.

Só teme a escuridão quem não possui luz em si mesmo. Só inveja o fogo quem há muito não passa de cinzas.
(Hidetaka Miyazaki, 2014).

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação e comparação, por meio de ensaios de laboratório, da variação das propriedades de resistência à compressão e ao cisalhamento de um solo residual do município de Joinville tratado com cimento Portland CP-V, com a adição de lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria têxtil na sua composição. A pesquisa experimental consistiu inicialmente na caracterização física do solo residual e do lodo de ETE. Posteriormente, por meio de métodos de dosagem, foram determinadas as frações de cada componente em quatro misturas diferentes, nas quais variou-se as porcentagens de lodo de ETE em 0%, 5%, 10% e 15% cada uma, com 3% de cimento. Para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas, foram moldados corpos de prova para as quatro misturas definidas, sendo alguns rompidos em compressão simples e outros submetidos ao ensaio de cisalhamento direto. Os resultados obtidos para as diferentes dosagens de lodo de ETE foram comparadas com as propriedades do solo residual tratado unicamente com cimento e concluiu-se que, à medida que maiores proporções de lodo foram adicionadas, as amostras apresentaram significativa perda de resistência à compressão simples, sendo que de modo geral, para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão simples, verificaram-se resistências relativamente baixas. A partir dos resultados iniciais do ensaio de compressão simples, foram moldados mais 3 corpos de prova com maior teor de cimento (7%) e 15% de lodo a fim de se verificar se a inserção de maior proporção de agente cimentante seria capaz de fornecer maiores resistências às amostras inibindo a perda de resistência causada pela quantidade mais pronunciada de lodo têxtil. Os resultados apontaram resistências significativamente maiores, cerca de 1425%, com dosagem de 7% de cimento e 15% de lodo, em relação à dosagem com 3% de cimento, indicando que para maiores porcentagens de cimento, mesmo com a adição da maior porcentagem de lodo, a mistura mostra-se com valores representativos de resistência. Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, foram moldadas amostras com 0%, 5%, e 10% de lodo, todas com 3% de cimento. A dosagem de 15% de lodo não foi avaliada no ensaio de cisalhamento, pelo baixo desempenho observado pela mesma nos ensaios de compressão simples. Foram obtidos valores um tanto discrepantes se comparados aos resultados esperados com base na literatura. O processo de moldagem dos corpos de prova utilizados no cisalhamento, considerando que foi moldado inicialmente um cilindro de solo de maiores dimensões (cilindro pequeno da compactação) e deste extraídos os corpos de prova menores utilizados para o ensaio, pode ter interferido na estrutura dos corpos de prova ensaiados, e, por consequência, no comportamento tensão-deformação definido pelo ensaio. Concluiu-se ao final das análises que a adição de lodo afeta de forma significativa a resistência à compressão do solo tratado com baixos valores de cimento (3%), sendo que porcentagens de lodo superiores a 10% em massa praticamente inibem a ação do cimento na mistura. No caso da utilização de maiores porcentagens de lodo na mistura, maiores teores de cimento seriam necessários para estabilizar o material. Em relação aos resultados do ensaio de cisalhamento direto, embora tenham sido afetados pelo processo de moldagem dos corpos de prova cimentados, foi possível identificar um leve incremento na coesão e redução significativa do ângulo de atrito das misturas com adição de lodo, fato que exigiria a adoção de taludes bastante suaves, caso as misturas fossem utilizadas em aterros.

Palavras-chave: Lodo de ETE. Indústria têxtil. Solo residual. Agente cimentante. Resistência à compressão simples. Cisalhamento direto.

ABSTRACT

This present thesis aims to evaluate and compare, through laboratory tests, the variation of the compressive strength and the shear stress properties of a residual soil in the city of Joinville with the mixture of sludge from industrial effluent treatment plant and the addition of cementing type Portland CP-V. The experimental research consisted initially in the physical characterization of the residual soil and the textile sludge. Subsequently, using dosage methods, the fractions of each component were determined in four different mixtures, in which the percentages of sludge were varied with 0%, 5%, 10% and 15%, with 3% cement. For the evaluation of the mechanical properties of the mixtures, samples were molded for the four defined compositions, being broken in simple compression and submitted to the direct shear test. The results obtained for the different sludge dosages were compared with the properties of the residual soil treated with cement and it was concluded that, as the greater proportion of textile sludge were add, the samples showed a significant loss of resistance in terms of simple compression. For all the samples submitted to the simple compression test, relatively low resistances were verified. From the obtained test result, 3 more specimens were molded, with higher cement content (7%), and 15% of sludge, in order to verify if the insertion of a higher proportion of cement would be able to provide greater resistance to the samples, inhibiting the losses of resistance caused by the textile sludge. The results showed significantly higher strengths, around 1425%, with a dosage of 7% cement and 15% sludge, if compared to the dosage with 3% of cement, indicating that for higher percentages of cement, even with the addition of the higher percentage of sludge, the mixtures shows representatives values of resistance. As for the direct shear test, samples were molded with 0%, 5% and 10% of textile sludge, all with 3% of cement. The 15% sludge dosage was not evaluated in the shear test, due to the low performance observed in the simple compression tests. Somewhat discrepant values were obtained when compared to the expected results based on the literature. The molding process of the specimens used in the direct shear test, considering that a larger soil cylinder was initially molded (small compaction cylinder) and from this the smaller specimens used for the test were extracted, may have interfered in the structure of the specimens tests, and, consequently, in the stress-strain behavior defined. It was concluded at the end of the analysis that the addition of sludge significantly affects the compressive resistance of the soil treated with low values of cement (3%), with sludge percentages above 10% by mass practically inhibiting the action of the cement. in the mixtures. In the case of using higher percentages of sludge in the mixture, higher cement contents would be needed to stabilize the material. Regarding the results of the direct shear test, although they were affected by the molding process of the cemented specimens, it was possible to identify a slight increase in cohesion and a significant reduction in the friction angle of the mixtures with the addition of sludge, a fact that would require the adoption of very smooth slopes, if the mixtures were used in landfills.

Keywords: Textile sludge. Residual soil. Cementing agent. Resistance to simple compression. Direct shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demandas de uso da água no Brasil por setor.	18
Figura 2 - Proporção das vazões consumidas de água por tipologia industrial.....	18
Figura 3 - Dados de geração de empregos segundo o BNDES.	20
Figura 4 - Estação de tratamento de efluentes.....	21
Figura 5 - Funcionamento da coagulação.....	22
Figura 6 - Esquema de tratamento por lodos ativados.....	23
Figura 7 - Caminhão sendo carregado com lodo têxtil.....	24
Figura 8 - Tipos de composições granulométricas.	30
Figura 9 - Efeito do teor de cimento na resistência para vários tipos de solo.	33
Figura 10 - Variação do logaritmo da resistência (P_{ult}) x γ_d	34
Figura 11 - Aumento da resistência em função do período de cura do cimento.	35
Figura 12 - Queda na resistência em função do tempo passado desde a mistura.	36
Figura 13 - Variação da resistência à compressão simples em função do teor de cimento.....	37
Figura 14 - Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento e porcentagem de material fresado de pavimentação.....	38
Figura 15 - Variação da resistência à compressão simples em função de porcentagens de lodo.	38
Figura 16 - Representação dos critérios de ruptura de Coulomb (a) e Mohr (b).....	39
Figura 17 - Envoltória de resistência na condição inundada de um solo de Ijuí-RS.....	40
Figura 18 - Resultado do ensaio de cisalhamento obtido para uma mistura de lodo de ETA com solo.	41
Figura 19 - Fluxograma do tratamento do efluente têxtil.....	43
Figura 20 - Lodo têxtil seco ao ar.....	43
Figura 21 - Lodo têxtil após secagem em estufa, preparado para mistura.	44
Figura 22 - Solo utilizado na pesquisa.	46
Figura 23 - Croqui de localização da obra em que o solo foi coletado.	46
Figura 24 - Cimento utilizado na pesquisa.	47
Figura 25 - Ensaio de sedimentação.	50
Figura 26 - Ensaio da massa específica real dos grãos.....	50
Figura 27 - Lodo têxtil com água para ensaio do limite de liquidez.	51
Figura 28 - Desmoldagem após o ensaio de compactação.	51
Figura 29 - Molde utilizado para elaboração dos corpos de prova.....	55

Figura 30 - Prensa utilizada para compactação dos corpos de prova.	56
Figura 31 - Corpos de prova moldados.	57
Figura 32 - Corpos de prova embaladas para o período de cura.	57
Figura 33 - Prensa utilizada para romper os corpos de prova no ensaio de compressão simples.	58
Figura 34 - Equipamento para cisalhamento direto em solos.....	59
Figura 35 - Caixa de cisalhamento direto, com pedras porosas e molde metálico.....	60
Figura 36 - Processo de moldagem dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto.	60
Figura 37 - Corpo de prova montado na caixa de cisalhamento.	61
Figura 38 - Caixa de cisalhamento aberta, com o corpo prova após a realização do ensaio....	62
Figura 39 - Curva granulométrica do lodo têxtil.	64
Figura 40 - Curva granulométrica do solo.....	66
Figura 41 - Resultado do ensaio de compactação do solo.....	67
Figura 42 - Ensaio do limite de liquidez para o solo.	68
Figura 43 - Variação da resistência à compressão simples para cada dosagem das misturas. .	72
Figura 44 - Ajuste linear da resistência (qu) à compressão em função do tempo (t) de cura...	72
Figura 45 - Relação da resistência à compressão em função do teor de lodo.	73
Figura 46 - Decréscimo na resistência à compressão em função do aumento do teor de lodo.	73
Figura 47 - Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento para amostras com 15% de lodo.	74
Figura 48 - Curva tensão-deformação para amostras sem adição de lodo.	77
Figura 49 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 0% de lodo.	77
Figura 50 - Curva tensão-deformação para amostras com 5% de lodo.	78
Figura 51 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 5% de lodo.	79
Figura 52 - Curva tensão-deformação para amostras com 10% de lodo.	80
Figura 53 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 10% de lodo.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de lodo têxtil no Estado de Santa Catarina.....	25
Tabela 2 - Efeitos de estabilizantes para diferentes tipos de solo.	29
Tabela 3 - Apresentação dos ensaios executados e respectivas normas de referência.	49
Tabela 4 - Resumo dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples para corpos de prova com 3% de cimento.	70
Tabela 5 - Resultados de resistência à compressão simples para corpos de prova com 7% de cimento.	74
Tabela 6 - Resumo dos dados das amostras do ensaio de resistência ao cisalhamento direto.	76
Tabela 7 - Resumo dos resultados do ensaio de cisalhamento direto.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados do ensaio de caracterização química do resíduo.....	45
Quadro 2 - Dosagem do ensaio de compressão simples.....	54
Quadro 3 - Dosagem do ensaio de cisalhamento direto.	54
Quadro 4 - Índices físicos do lodo têxtil.....	64
Quadro 5 - Ensaio do limite de plasticidade para o solo.	68
Quadro 6 - Índices físicos do solo.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

ETA – Estação de tratamento de água

ETE – Estação de tratamento de efluentes

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	OBJETIVOS	15
1.1.1.	Objetivo Geral.....	15
1.1.2.	Objetivos Específicos	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1.	TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS	17
2.1.1	Conceitos Gerais	17
2.1.2.	Tratamento de efluentes em indústrias têxteis.....	19
2.1.2.1	Processo de coagulação/floculação	22
2.1.2.2	Lodos ativados	23
2.2	LODO TÊXTIL	24
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	28
2.2.1.	Estabilização Mecânica	29
2.2.2.	Estabilização Granulométrica	30
2.2.3.	Estabilização Química	31
2.2.3.1	Estabilização Solo-cimento	31
2.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	36
2.5	CISALHAMENTO DIRETO	39
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	42
3.1	MATERIAIS	42
3.1.1.	Lodo têxtil.....	42
3.1.2.	Solo	45
3.1.3.	Cimento.....	46
3.1.4.	Água destilada.....	47
3.2	METODOLOGIA.....	47
3.2.1.	Programa experimental.....	48
3.2.2.	Caracterização geotécnica dos materiais.....	49
3.3	DOSAGEM	51
3.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	55
3.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	58
4.	RESULTADOS	63

4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LODO TÊXTIL	63
4.1.2	Caracterização física do lodo têxtil	63
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	65
4.1.2	Caracterização física do solo	65
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	69
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	75
4.5	PREMISSAS DE APLICAÇÕES DAS MISTURAS ESTUDADAS	82
5.	CONCLUSÃO	84
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86

1. INTRODUÇÃO

Os efluentes industriais e sanitários configuram grandes poluidores de solos e principalmente águas, sendo que, muitas vezes, são descartados de maneira indevida em corpos hídricos. A poluição, segundo Fellenberg (1980), é qualquer alteração física, química ou biológica que produza modificação no ciclo biológico normal, interferindo na composição da fauna e da flora do meio. De acordo com Mucelin (2007), o crescimento populacional, a consequente expansão territorial urbana e a ampliação do sistema de produção e consumo industrial têm contribuído para agravar as condições ambientais, sobretudo do cenário urbano.

Com o objetivo de minimizar os efeitos de poluição causados pelo lançamento de efluentes sanitários e industriais em corpos hídricos, no Brasil, as Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) tem sido amplamente utilizadas, sendo que, muitas vezes, as composições industriais possuem as próprias unidades de tratamento, que podem operar com diferentes sistemas tecnológicos. O resultado da adoção de um sistema de Estação de Tratamento de Efluentes eficiente é, de acordo com Kelm (2014), água com grau de pureza adequado, livre de grande parte dos resíduos, contaminantes e nutrientes gerados no processo produtivo industrial ou uso sanitário, sendo possível o lançamento em corpo hídrico de maneira adequada.

No entanto, durante o processo de tratamento de efluentes, ocorre a formação de um composto chamado de lodo de ETE, resíduo predominantemente orgânico com textura pastosa. Embora o lodo das ETEs, na maior parte dos processos de tratamento, corresponda a 95% de água, por convenção é denominado como uma fase sólida, distinguindo-se do fluxo do líquido em tratamento. Esse lodo é o principal resíduo sólido gerado no processo de tratamento de efluentes em termos de volume e importância (SANTOS, 2003).

De acordo com Inguza *et al.* (2016), a atual taxa de geração de resíduos acarretada da evolução tecnológica e do crescimento populacional, impede a geração de um equilíbrio hábil entre o consumo e a reciclagem/reuso, gerando problemas de poluição resultantes da gestão inadequada dos resíduos. Diante disso, é preciso atingir um novo equilíbrio entre o crescimento industrial, as demandas por produtos industrializados e a geração e tratamento dos resíduos, como o lodo de ETE, gerado nesses processos. Uma maneira de atingir tal equilíbrio é aliar parâmetros técnicos e econômicos com a sustentabilidade ambiental, propiciando maneiras de reciclagem ou reuso destes resíduos.

A possibilidade de combinação destes lodos de ETE com outros componentes, objetivando formar um material com características importantes, do ponto de vista técnico e econômico, para implementação em fins mais nobres, acaba se tornando atrativa para os setores

industriais e também ambientais, sendo que diminui os custos da eliminação para empresas responsáveis pelos resíduos e define uma destinação útil para esse material, conforme disposto por Prim (2011).

O lodo produzido em uma estação de tratamento corresponde a cerca de 1% ou 2% do volume do efluente tratado, entretanto, o tratamento e a disposição final desse resíduo representam de 30% a 50% do custo operacional desse procedimento, conforme a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR, 1999). Atualmente, já ocorre a implementação de lodo tratado para fertilização de solos usados na agricultura, substituição de finos em argamassas, cobertura de aterros sanitários, entre outras finalidades (BITTENCOURT *et al.*, 2012; COSTA, 2014; RIGO *et al.*, 2014).

De acordo com Petry (2015), a construção civil é uma excelente alternativa para receber esses resíduos, já que a extração de matérias-primas utilizada por este segmento gera grandes impactos e apresentam um consumo elevado de energia. Ainda segundo Petry (2015), para tornar viável a utilização e/ou tratamento de resíduos para diferentes fins, são necessários estudos que possam avaliar as propriedades em relação às solicitações mecânicas, podendo-se citar: resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, durabilidade, resistência ao cisalhamento, entre outras.

Desse modo, justifica-se a execução deste trabalho, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de uma mistura de solo residual do município de Joinville/SC, com lodo de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil com a inserção de agente cimentante. Avaliando-se o comportamento das misturas e o provável decréscimo da resistência à compressão simples e cisalhamento direto pela adição do lodo, objetiva-se avaliar o possível emprego desta mistura para composições de aterros, camadas de reforço de subleito, entre outras finalidades e aplicações de engenharia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as variações causadas pela presença de diferentes porcentagens de lodo de estação de tratamento de efluentes têxteis em uma mistura com solo residual do município de Joinville tratado com cimento, no que diz respeito às suas propriedades mecânicas de resistência à compressão e cisalhamento direto.

1.1.2. Objetivos Específicos

O objetivo geral pode ser alcançado seguindo os objetivos específicos dispostos a seguir:

- Definir as características físicas do lodo da estação de tratamento e do solo residual;
- Estudar e definir a dosagem adequada para a composição das misturas;
- Determinar a resistência à compressão simples do solo residual compactado e tratado somente com agente cimentante e das misturas de solo-cimento com diferentes porcentagens de lodo;
- Apresentar premissas e discussões relacionadas ao possível emprego das composições de solo, cimento e lodo estudadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de conceitos gerais sobre o tratamento de efluentes industriais, lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) e o processo que resulta na sua formação, dando ênfase no processo de tratamento de efluentes dentro do setor têxtil, uma vez que o lodo utilizado para execução deste trabalho foi disponibilizado por uma indústria desse setor. Também serão abordados conceitos de melhoramento de solos e ensaios de resistência mecânica.

2.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Segundo a Norma Brasileira NBR 9800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1987), o efluente líquido industrial consiste no despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo efluentes do processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico. De acordo com a mesma norma, para o lançamento destes efluentes no sistema público municipal ou corpo receptor, os mesmos devem obedecer a valores limites de parâmetros relacionados à sua composição passando pelo processo de tratamento. A seguir serão apresentados conceitos relacionados ao tratamento destes efluentes.

2.1.1 Conceitos Gerais

Atualmente o setor industrial configura como um dos maiores consumidores do total de água dos reservatórios, conforme dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019), expostos na Figura 1. Segundo Giordano (1999), a utilização de água nas indústrias pode ocorrer de diversas formas e em inúmeros processos produtivos diferentes, dependendo do tipo de produto ou serviços e processos associados.

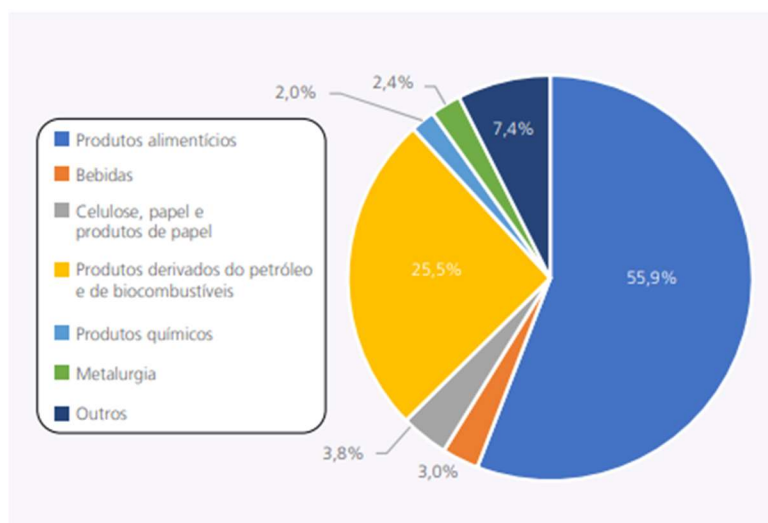
Figura 1 - Demandas de uso da água no Brasil por setor.



Fonte: ANA (2019).

Entre os usos difundidos da água no setor industrial, é possível destacar o uso como matéria prima, lavagem de máquinas, lavagem de equipamentos, lavagem das dependências da empresa, reagente ou solvente de substâncias diversas, sistemas de resfriamento e geradores de vapor, esgotamento sanitário dos funcionários, entre outras. A distribuição do consumo de água por setor industrial pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Proporção das vazões consumidas de água por tipologia industrial.



Fonte: ANA (2017).

De acordo com Giordano (1999), historicamente, o crescimento industrial ocorreu principalmente em regiões próximas aos corpos hídricos, devido à disponibilidade de água para abastecimento e a possibilidade de utilizar o rio como corpo receptor dos dejetos oriundos do processo industrial. Ao longo do tempo, o crescimento significativo dos centros urbanos e das composições industriais fez com que os corpos hídricos passassem a receber cargas de efluentes excessivas, comprometendo ecossistemas e a qualidade da água captada por populações ribeirinhas à jusante do corpo hídrico. Diante disso, viu-se a necessidade de regulamentação da qualidade dos efluentes industriais e sanitários lançados nos rios, conforme disposto na Resolução 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011).

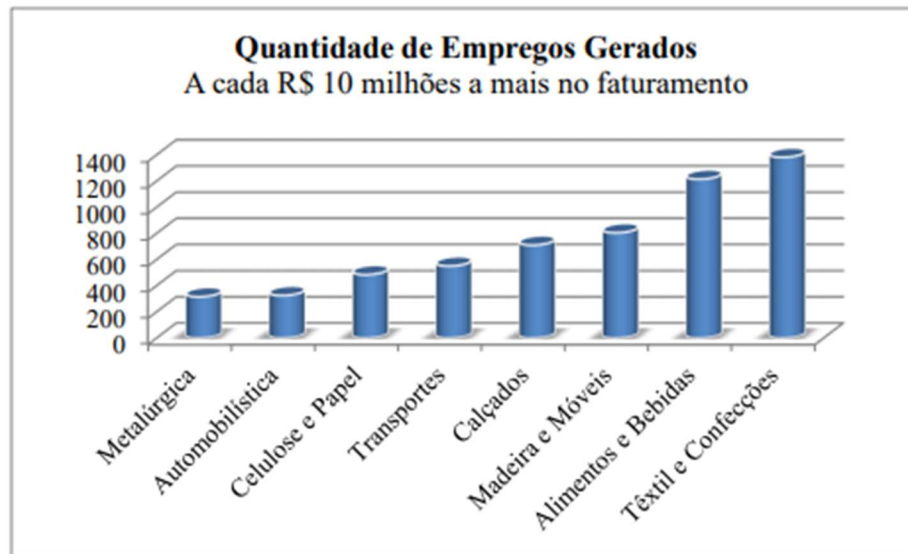
Leão *et al.* (2002) defendem que a poluição pelos efluentes líquidos industriais deve ser controlada inicialmente pela redução de perdas nos processos, incluindo a utilização de processos mais modernos, arranjo geral otimizado, redução do consumo de água e manutenção dos equipamentos, tubulações e maquinários para evitar vazamentos ou contaminação hídrica, e busca por insumos e processos menos agressivos ao meio ambiente. Após a verificação da eficiência do processo industrial, a poluição da água deve ser controlada utilizando-se sistemas de tratamento de efluentes líquidos.

Os processos de tratamento a serem adotados, suas formas construtivas e os materiais a serem empregados são considerados a partir dos seguintes fatores: legislação ambiental regional; clima; cultura local; custos de investimento; custos operacionais; quantidade; qualidade do lodo gerado. O resultado esperado a partir da adoção de um sistema de tratamento de efluentes é a transformação dos poluentes dissolvidos e em suspensão em gases inertes e sólidos sedimentáveis para a posterior separação das fases líquida e sólida.

2.1.2. Tratamento de efluentes em indústrias têxteis

No que diz respeito à produção e ao número de trabalhadores que emprega, a indústria têxtil é uma das maiores do mundo e todas se caracterizam por requerer grandes quantidades de água, corantes e produtos químicos utilizados ao longo de uma complexa cadeia produtiva, o que resulta em grande quantidade de efluentes gerados (SANIN, 1997). O setor têxtil possui um dos maiores potenciais de geração de empregos. No ano de 2014, a cadeia produtiva têxtil do Brasil era formada por 30.000 empresas entre fiações, tecelagens, malharias, estamparias, tinturarias e confecções, contribuindo com a formação de 1,3 milhão de empregos formais e informais no Brasil, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Dados de geração de empregos segundo o BNDES.



Fonte: BNDES apud OLIVEIRA (2014).

O estado de Santa Catarina apresenta um expressivo parque fabril, no qual se destaca o setor têxtil como o terceiro maior do país. As indústrias têxteis e de vestuário, calçados e artefatos de tecidos estão concentradas principalmente na região do Vale do Itajaí e respondem por 25% do valor da transformação industrial catarinense (FIESC, 1996).

De acordo com Dos Santos *et al.* (2002), devido à grande variabilidade de produtos, processos, maquinários e equipamentos empregados nesse tipo de indústria, geralmente observa-se uma grande variação na quantidade de água e no tipo de efluente gerado. Desse modo, é fundamental o conhecimento das propriedades do efluente gerado com o propósito de se definir o tipo de tratamento mais adequado.

Em virtude da complexidade da cadeia produtiva que envolve a sequência de produção e acabamento têxtil estes efluentes caracterizam-se por uma grande variação de cargas, presença de corantes, tensoativos espessantes e produtos químicos diversos que tornam o efluente muito complexo e com diferentes características de biodegradação quando comparado a efluentes industriais provenientes de outros setores industriais (HASSEMER *et al.*, 2002).

Semelhante à Hassemer *et al.* (2002), uma característica particular do efluente líquido proveniente de processos industriais têxteis é a cor, que ocorre devido à não fixação de parte dos corantes nas fibras de tecidos durante o procedimento de tingimento. Devido à composição química, os corantes são facilmente detectáveis a olho nu, mesmo que em baixas concentrações, o que, por sua vez, configura uma desvantagem bastante significativa, pois uma pequena

concentração desse componente químico no efluente tratado pode ocasionar na mudança de coloração do corpo hídrico receptor (TWARDOKUS, 2004).

Além dos corantes, o efluente têxtil possui altos teores de compostos orgânicos provenientes de produtos químicos utilizados no decorrer do processo industrial como sabões, gomas, amidos, detergentes, entre outros. Compostos inorgânicos como hidróxido de sódio, carbonatos, sulfetos e cloretos também podem ser encontrados, contribuindo com o alto grau de complexidade desse efluente (CHAGAS, 2009).

Os efluentes gerados pelas unidades industriais normalmente são tratados por processos físico-químicos e biológicos convencionais (coagulação química e lodos ativados), os quais apresentam bons resultados na redução dos contaminantes, mas tem como inconveniente a alta produção de lodo e a necessidade de disponibilização de grandes áreas para implantação do processo de tratamento e de aterros sanitários industriais para disposição do lodo. Além disso, estes efluentes caracterizam-se por uma grande variação de cargas em razão da própria variação do processo industrial que envolve a sequência de produção e acabamento têxtil, em cujo processo são utilizados corantes, tensoativos espessantes e produtos químicos diversos que tornam o efluente muito complexo e com diferentes características de biodegradação (HASSEMER *et al.*, 2002).

Conforme Kunz *et al.* (2002), em geral, na indústria têxtil os processos de tratamento fundamentados na operação de precipitação/coagulação seguida de tratamento biológico por meio de lodos ativados, apresentam uma eficiência relativamente alta, permitindo a remoção de aproximadamente 80% da carga de corantes. Ainda segundo Leão *et al.* 2002, essa sequência de tratamento resulta, além de uma eficiência de remoção de contaminantes adequada, uma boa relação de custo benefício quando comparada a outros meios de tratamento.

Figura 4 - Estação de tratamento de efluentes.



Fonte: Guedes (2012).

Nos subitens apresentados a seguir, serão apresentados os processos de tratamento de efluentes que resultaram na formação do lodo utilizado no presente trabalho.

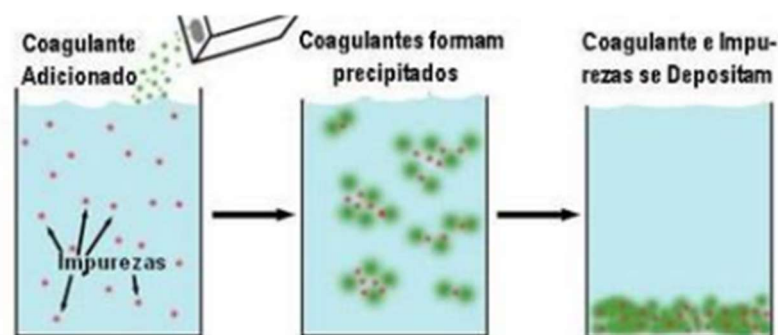
2.1.2.1 Processo de coagulação/floculação

No processo de coagulação, o objetivo consiste na aglomeração de partículas finas em suspensão e impurezas em partículas maiores que podem ser separadas do efluente por outros processos, como o de filtração, sedimentação ou flotação. Estas partículas geralmente apresentam cargas negativas na sua composição química, o que resulta na formação de uma nuvem de íons positivos e negativos ao seu redor, gerando assim, uma estabilidade química do sistema pela repulsão mútua entre as partículas, impossibilitando a separação destas do efluente que se deseja tratar (COGO, 2011).

Ainda segundo Cogo (2011), visto a estabilidade química das partículas finas presentes no efluente, são adicionados coagulantes com o intuito de desestabilizar a repulsão entre as partículas e conseqüentemente desestabilizar o equilíbrio do sistema. Os coagulantes, normalmente utilizados nos processos de coagulação, são compostos por cátions polivalentes (Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , entre outros) que neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas (CAVALCANTI, 2009).

A floculação é a etapa subsequente, na qual as partículas que se tornaram maiores devido à ação dos coagulantes, sedimentam pela ação da gravidade. A inserção de agentes floculantes se faz necessária quando o tamanho das partículas resultantes desse processo não são suficientemente grandes para separação efetiva por sedimentação. A obtenção de partículas de impurezas maiores facilita a retirada das mesmas do efluente, sendo o processo descrito anteriormente apresentado de forma simplificada na Figura 5.

Figura 5 - Funcionamento da coagulação.



Fonte: Naturaltec apud Rodrigues (2016).

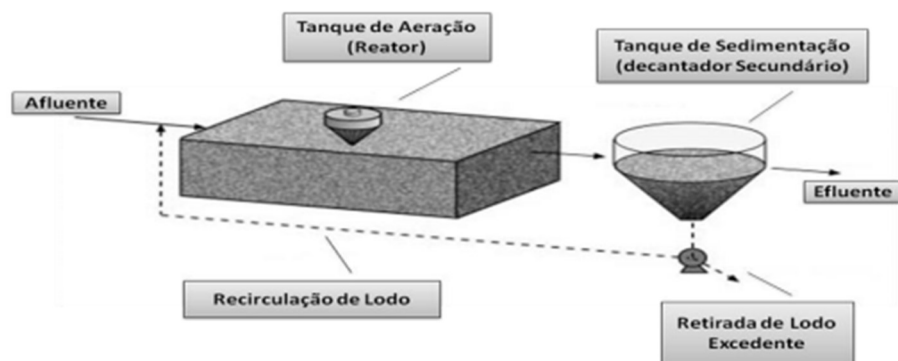
2.1.2.2 Lodos ativados

Como forma de complementação dos processos físico-químicos de tratamento de efluentes, processos biológicos como o de lodos ativados são utilizados amplamente, principalmente no contexto das indústrias têxteis (KUNZ *et al.*, 2002). Segundo Cogo (2011), o método de tratamento de efluentes industriais por meio de lodos ativados consiste na criação de uma cultura microbiológica em um tanque chamado de tanque de aeração, no qual é introduzido oxigênio puro ou ar atmosférico por um sistema de aeração mecânica.

Esse método de tratamento tem como finalidade alimentar o crescimento e o desenvolvimento dos microorganismos, além de proporcionar homogeneidade ao sistema evitando a deposição dos flocos bacterianos. Desse modo, o desenvolvimento de uma colônia microbiológica no tanque de aeração proporciona o consumo da matéria orgânica presente no efluente bruto, sendo a aeração fundamental para fornecer concentrações adequadas de oxigênio no sistema, necessário para o metabolismo dos microrganismos (COGO, 2011).

Assim, de acordo com o Centro Experimental de Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro (CESA/UFRJ, 2020), por meio do consumo de matéria orgânica pela cultura biológica no tanque de aeração forma-se o lodo ativado, devendo ser separado do efluente no tanque de decantação ou decantador secundário, cuja finalidade é concentrar o lodo formado para posterior sedimentação. Parte do lodo que sedimenta, é retirado do decantador secundário e encaminhado geralmente para aterros industriais, o restante desse material retorna para o tanque de aeração com o propósito de garantir a elevada concentração de biomassa no sistema possibilitando adequada eficiência na remoção de matéria orgânica. A Figura 6 apresenta de forma esquemática o processo de tratamento por lodos ativados.

Figura 6 - Esquema de tratamento por lodos ativados.



Fonte: Von Sperling (1999) apud Cogo (2011).

2.2 LODO TÊXTIL

De acordo com a NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação, o lodo têxtil é um definido como um material não inerte de Classe IIA. Este resíduo deve ter uma destinação correta devido a sua composição complexa, pois se utilizam corantes no processo de tingimento, além de soda, polímeros, sulfato de alumínio, ferro, cal e outros produtos utilizados no processo de tratamento de efluentes (HEREK *et al.*, 2005).

Similar ao descrito por Herek *et al.* (2005), de acordo com Kelm (2014), existe uma preocupação crescente com relação à disposição do lodo de estação de tratamento de efluentes, em decorrência da ampliação dos sistemas de tratamento e das leis ambientais, que a cada dia tornam-se mais exigentes. Por apresentar em sua composição, metais pesados, microrganismos patogênicos e outros compostos tóxicos, mesmo após o processo de tratamento, o lodo quando disposto de maneira inadequada, pode trazer danos ao meio ambiente e a saúde humana.

Mesmo apresentando composições bastante variadas, o lodo têxtil, de modo geral, é composto basicamente por água, óxidos de minerais e matéria orgânica. A água é proveniente do processo de fabricação dos tecidos, os óxidos minerais vêm da poeira em suspensão no ar e do processo de tingimento dos tecidos, onde são utilizados pigmentos inorgânicos, que contribuem com a formação de resíduos. A matéria orgânica é proveniente das fibras dos tecidos e das bactérias e microrganismos presentes nas estações de tratamento de efluentes (GUEDES, 2012). A Figura 7 mostra um caminhão sendo carregado com lodo de estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil.

Figura 7 - Caminhão sendo carregado com lodo têxtil.



Fonte: Guedes (2012).

Ainda segundo Guedes (2012), o processo industrial das indústrias têxteis leva a uma alta produção diária de lodos, fazendo com que as indústrias procurem meios adequados para o seu descarte, afetando o mínimo possível o meio ambiente. Estes descartes, em muitos casos são realizados em aterros sanitários, causando um considerável impacto ambiental, podendo vir a acarretar em danos ao meio ambiente. Além disso, as indústrias sofrem com os custos elevados desse descarte que envolvem operações logísticas (transporte dos resíduos) e manutenção dos aterros sanitários.

A partir de dados levantados por Prim (1996), constatou-se que a produção de lodo têxtil no estado de Santa Catarina no ano de 1996 foi de aproximadamente 20.000 toneladas por mês. Salienta-se que a partir do crescimento considerável do setor industrial no estado a produção atual de lodo têxtil deve apresentar valores significativamente maiores. Os dados levantados por Prim (1996) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de lodo têxtil no Estado de Santa Catarina.

Porte da indústria	Produção de lodo estimada (ton/mês)	Total de indústrias têxteis	Total de produção de lodo (ton/mês)
Grande	333,75	24	8.010
Médio	140,82	49	6.900
Pequeno	33,33	109	3.633
		Total geral	19.543

Fonte: adaptado de Prim (1996).

Devido à escassez de grandes áreas disponíveis, e uma maior conscientização em relação à questão ambiental, o sistema de aterro deve ser usado para complementar as soluções de tratamento de resíduos sólidos industriais, devendo ser preferencialmente usado quando os resíduos não puderem ter seu volume mais reduzido, podendo constituir muitas vezes a única solução de disposição final para alguns tipos de resíduos (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000).

Desse modo, justifica-se a busca por uma aplicação desse tipo de resíduo, visando reduzir o descarte desse material na natureza ou em aterro sanitários, já que a elevada quantidade produzida desse resíduo propicia um grave problema no que diz respeito a questões ambientais e econômicas. Guedes (2012) caracterizou e estudou a incorporação de lodo têxtil na composição de argamassas, aplicando diversas dosagens com diferentes percentuais de lodo, 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, como material substituinte do cimento, com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Os resultados de resistência a compressão demonstraram que todas as composições de argamassas apresentaram resultados satisfatórios se comparados aos padrões exigidos pelas normas da ABNT em vigência.

Castro (2010) estudou a utilização do lodo gerado do tratamento de efluente têxtil em blocos cerâmicos acústicos. As dosagens dos blocos cerâmicos abordadas na tese englobam as frações de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% de lodo. O autor realizou ensaios de análises químicas, análises físicas e análises mecânicas, como de resistência à compressão. Com a adição de 20% de lodo têxtil os blocos cerâmicos acústicos apresentaram melhores propriedades de absorção sonora, maiores inclusive do que os blocos de referência avaliados, devido a maior quantidade e variedade de poros formados com a adição do lodo.

Prim *et al.* (2000) estudou a adição do lodo com cimento em blocos de concreto. Os autores obtiveram resistências na ordem de 30 MPa para uma mistura constituída de 30% de lodo com cimento e da ordem de 20 MPa para misturas com 20% de cinza pesada, 30% de lodo e cimento. Os autores consideraram a utilização de lodo e cinza como sendo um único resíduo, sendo 50% a incorporação de resíduos ao cimento conferindo uma resistência de 20 MPa aos blocos de concreto, atribuindo desempenhos satisfatórios para a aplicação na construção civil.

Almeida (2009) avaliou a influência dos diferentes tipos de argilas na qualidade dos blocos cerâmicos de vedação, incorporados com lodo têxtil, por meio do processo de solidificação/estabilização. Nesse estudo, adotou-se a incorporação de 15% de lodo têxtil na fabricação de blocos cerâmicos em escala reduzida, sendo estes submetidos a testes de resistência a compressão, lixiviação, solubilização e absorção de água, de acordo com as respectivas normas brasileiras. Observou-se que os processos de solidificação/estabilização foram capazes de imobilizar de forma eficaz, os metais presentes no lodo têxtil, mostrando-se como um promissor processo para destinação mais nobre desse resíduo. Estudos similares aos apresentados anteriormente reforçam a possibilidade de se incorporar o resíduo de lodo têxtil em diversos setores da construção civil.

Kelm (2014) estudou o uso sustentável de lodo de estação de tratamento de efluentes na estabilização para materiais de pavimentação em suas diferentes formas (*in natura*, seco e calcinado). A partir dos experimentos realizados que consistiram na análise mecânica e ambiental das misturas, pode-se concluir que a mistura composta por lodo *in natura*, pó de pedra e cimento, apresentou resultados satisfatórios, podendo ser utilizada em camadas de base e sub-base de pavimentos.

No âmbito ambiental, no Brasil não existe normativa específica sobre o uso de lodos de estação de tratamento de efluentes em aplicações de engenharia. A norma utilizada para avaliação dos riscos associados a questões ambientais é a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), responsável por caracterizar os resíduos sólidos em diferentes níveis de periculosidade, considerando riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Apesar de no momento de sua

formação, os lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes apresentarem grande percentual de água, de acordo com essa norma, os mesmos são tratados como sendo resíduos sólidos.

De acordo com a NBR 10.004/2004, são definidos como resíduos de Classe I - Perigosos, aqueles que quando não gerenciados de maneira adequada, podem acarretar em danos ao meio ambiente ou à saúde pública em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas. Os resíduos classificados como perigosos (Classe I) apresentam aspectos relacionados à corrosividade, reatividade, inflamabilidade, toxicidade ou patogenicidade.

Ainda segundo a NBR 10.004/2004, os resíduos que não se enquadram como resíduos perigosos, são classificados como Resíduos de Classe II, denominados não perigosos. Estes, podem ser subdivididos em dois grupos. Os Resíduos de Classe II A – Não inertes – são aqueles que não se enquadram nas classificações de Classe I e apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os resíduos de Classe II B – Inertes – são aqueles que quando imersos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes químicos solubilizados em concentrações acima dos padrões de potabilidade de água, exceto no que diz respeito aos parâmetros de cor, turbidez, dureza e sabor.

Desse modo, para correta classificação do resíduo de lodo de estação de tratamento de efluentes, deve ser feito o ensaio de caracterização de resíduo tendo como referência a NBR 10.004/2004. Além disso, no âmbito da legislação ambiental, foi instituído pela Portaria nº 280 de 2020 do Diário Oficial da União, o Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR Nacional como ferramenta de gestão e documento declaratório de implantação e operacionalização do plano de gerenciamento de resíduos sólidos.

A utilização do MTR é obrigatória em todo território Nacional para todos os geradores de resíduos sujeitos à elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. O objetivo do sistema é ser uma ferramenta online capaz de rastrear a quantidade de resíduos gerada, bem como o armazenamento, o transporte e a destinação final. O funcionamento consiste na emissão do Manifesto de Transporte de Resíduo por parte de um gerador, no caso aquele que geraria o resíduo do lodo têxtil, por exemplo. Nesse manifesto consta o tipo e a quantidade de resíduo gerado.

O manifesto é então recebido pelo transportador, responsável por levar o resíduo até o destinador final, que deve dar a baixa de recebimento no sistema, conferindo o tipo de resíduo e as quantidades com o informado pelo gerador no início do processo. Esse procedimento permite o rastreamento e conferência do correto transporte e destinação do resíduo gerado. Vale

salientar que tanto o transportador, quando o destinador, devem possuir as respectivas licenças ambientais próprias para transporte e destinação de resíduos.

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Segundo Gondim (2008), o solo é o material de construção com maior aplicabilidade e maior abundância no mundo. Entretanto, para a utilização de solos em soluções de problemas de engenharia, os mesmos precisam atender a critérios técnicos rigorosos, o que muitas vezes, restringe a utilização de jazidas de solos de qualidade tecnológica inferior, localizados próximas à região da obra. O transporte de materiais, principalmente a grandes distâncias, traz acréscimos de custos no orçamento final da obra, sendo que os custos de aquisição, escavação e transporte de materiais distantes dos canteiros, pode acarretar na inviabilização econômica para construção de um determinado empreendimento.

A partir da situação descrita, tem-se buscado modificar as propriedades dos materiais localizados próximos da região da obra, a partir de intervenções mecânicas ou aplicação de aditivos no solo, com o objetivo de se obter uma solução adequada tecnicamente e economicamente. Em resumo, o processo de estabilização de solos consiste na aplicação de um fator estabilizante no solo, visando modificar as suas propriedades, com o intuito de atender às solicitações previstas em projeto. O fator estabilizante pode ser um aditivo químico como cal ou cimento, um material granular ou a aplicação de energia mecânica (GONDIM, 2008).

Araújo *et. al.* (1983), apontam a construção de aeroportos e estradas como tipo de empreendimento com maior aplicabilidade da técnica de estabilização de solos. Isso se deve ao fato, de as obras necessárias para implantação desse tipo de construção apresentarem extensas áreas envolvidas em trabalhos de pavimentação, o que justifica economicamente a despesa com melhoramento de solos locais, ao invés da aquisição, escavação e transporte de materiais distantes do local da obra.

No contexto de Gondim (2008), normalmente as propriedades de um solo que se deseja melhorar são as relacionadas à expansibilidade, à resistência mecânica, à durabilidade e à permeabilidade. Para se escolher o método de estabilização de solo que se deseja aplicar, deve-se avaliar aquele que se adequa em melhorar as propriedades do solo que precisam ser corrigidas, e os propósitos do processo de estabilização. A Tabela 2 disposta a seguir, apresenta efeitos de diferentes estabilizantes para diferentes tipos de solo.

Tabela 2 - Efeitos de estabilizantes para diferentes tipos de solo.

Tipo de Solo	Estabilizante Recomendado	Efeitos
Areia	Argila	Aumento da estabilidade mecânica
	Cimento	Aumento da densidade e coesão
	Betume	Aumento da coesão
Caulinita	Areia	Aumento da estabilidade mecânica
	Cimento	Aumento da resistência a curto prazo
	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Ilita	Cimento	Aumento da resistência a curto prazo
	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo
Montmorilonita	Cal	Melhor trabalhabilidade e resistência a longo prazo

Fonte: Gondim, 2008.

As alterações nas propriedades do solo podem ser classificadas como sendo estabilização mecânica, estabilização granulométrica, e estabilização química. Os principais tipos de estabilização apresentados serão descritos nos itens subsequentes.

2.2.1. Estabilização Mecânica

Segundo Medina e Motta (2005), a estabilização mecânica consiste na aplicação de uma energia externa de compactação aplicada ao solo, com o propósito de se reduzirem os vazios, tornando-o mais resistente ao esforço externo, alterando a permeabilidade e a compressibilidade. Esse método de estabilização, pode ser utilizado individualmente ou em conjunto com outros métodos.

Deve-se procurar atingir sempre o menor índice de vazios possível, pois caso este índice seja muito elevado no solo, existe a possibilidade de ocorrência de fenômenos de liquefação em solos granulares. Além disso, em solos que possuem grandes volumes de vazios, a água penetra com maior facilidade, diminuindo as forças de atrito entre as partículas, funcionando como um lubrificante, que permite o deslizamento entre partículas do solo com maior facilidade, propiciando ao solo o risco de colapso (CRISTELO, 2011).

2.2.2. Estabilização Granulométrica

Segundo Villibor (1982), a estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporções adequadas, com o objetivo de se obter um produto final de estabilidade maior do que os solos de origem, tornando-se adequado para a aplicação em determinada situação. Os fatores que influenciam no comportamento dos solos submetidos à estabilização granulométrica, é basicamente a natureza das partículas, que devem ser resistentes aos esforços requeridos, e a estabilização da composição.

De acordo com Senço (2001), nesse tipo de estabilização, em maneira geral, a distribuição das porções de tamanhos diferentes de partículas deve ser tal que os vazios dos grãos maiores sejam preenchidos pelos grãos de tamanhos intermediários, e os vazios desses, sejam preenchidos pelos grãos de menores dimensões. O conjunto resultante, deve representar um solo de massa específica aparente superior àquela que seria apresentada pelo material original não estabilizado. Isso proporciona ao solo estabilizado maiores resistência e rigidez e menor permeabilidade, além de exigir, em caso do uso de algum aglomerante, como cimento, asfalto, cal e outros, o mínimo consumo desse aglomerante.

Além do citado anteriormente, Cristelo (2011) afirma que a correção granulométrica de solos é uma das formas de redução do índice de plasticidade e do limite de liquidez. Isso ocorre misturando um solo pouco plástico ao solo que se deseja estabilizar, de elevado potencial plástico, sendo que a dosagem dos solos a serem combinados pode ser obtida pela determinação experimental do índice de plasticidade e do limite de liquidez das próprias misturas.

A figura 8 apresentada a seguir, demonstra diversas composições de estabilizações granulométricas de solos, sendo o item (b) a situação ideal de emprego desse tipo de solução.

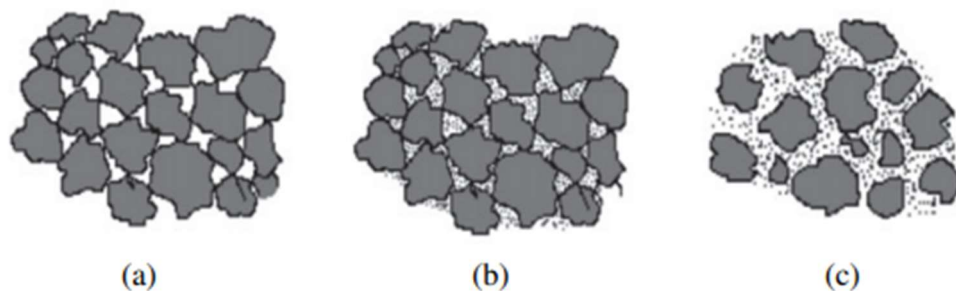


Figura 8 - Tipos de composições granulométricas.

Fonte: Gondim (2008).

2.2.3. Estabilização Química

O processo de estabilização química consiste do uso de agentes estabilizantes que reagem com as partículas do solo, modificando suas propriedades físicas, resultando no melhoramento e estabilidade das suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Neste tipo de estabilização, diversos aditivos podem ser utilizados para que ocorram reações químicas com o solo a ser melhorado. As partículas do solo são geralmente aglutinadas pelo aditivo, que pode ser o cimento, a cal, produtos betuminosos, polímeros, entre outros (GONDIM, 2008).

Similar ao descrito por Gondim, Medina e Motta (2005) afirmam que a estabilização química ocorre a partir da adição de um ou mais produtos químicos (agentes estabilizadores) que ao reagirem com as partículas de solo, aglomeram-nas, vedam os poros ou tornam o solo repelente à água. Como exemplos de reações químicas que ocorrem nesse tipo de estabilização, podem ser citados a troca catiônica, a carbonatação e a cimentação.

Neste tipo de estabilização podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos. A estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre normalmente ao cimento, à cal e aos materiais betuminosos (CRISTELO, 2011). Neste trabalho será dada ênfase à estabilização com utilização de cimento, a qual será adotada na pesquisa realizada.

2.2.3.1 Estabilização Solo-cimento

O cimento é um dos estabilizantes mais conhecidos e aplicados na estabilização química dos solos. A ação do cimento nos grãos do solo ocorre por meio de reações de hidrólise e hidratação, que estabelecem ligações mecânicas e químicas entre o cimento e a superfície rugosa dos grãos que compõem o solo a ser melhorado, sendo mais ativa quanto maior for o contato entre o solo e as partículas de cimento (LUCENA, 2012).

A norma NBR 12253:2012 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento, define solo-cimento como um “produto endurecido resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, e executada de acordo com a NBR 12254:2013 – Execução de base de solo-cimento - procedimento.”

Para Ingles e Metcalf (1972), a técnica de solo-cimento consiste na escarificação do solo, adição do cimento à superfície da camada de solo solto, mistura do solo com o cimento pulverizado, adição de água e compactação da mistura. Com a hidratação do cimento, a mistura

será estabilizada, resultando em um material de maior resistência mecânica e menos susceptível às ações da água.

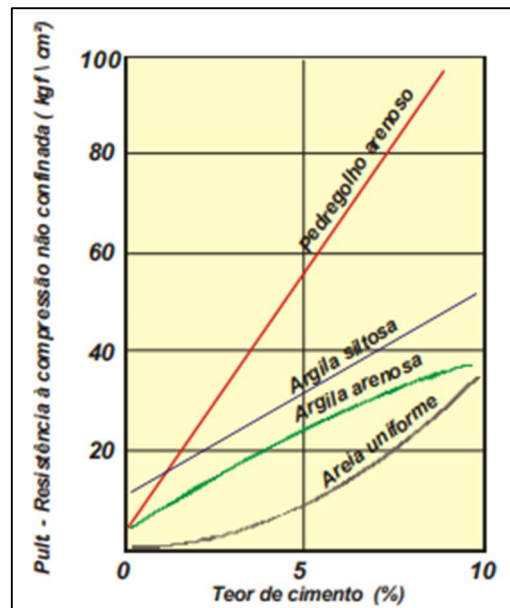
Segundo Cristelo (2011), a estabilização solo-cimento é resultado da preparação de uma mistura de solo finamente pulverizado, cimento e água, em proporções previamente determinadas. Normalmente a percentagem de cimento situa-se entre 5 a 7% para siltes e argilas, entretanto, de acordo com Ingles e Metcalf (1972), a adição de até mesmo pequenas quantidades de cimento, até 2%, é capaz de modificar as propriedades do solo. A mistura assim obtida é aplicada e compactada, respeitando o tempo de cura (normalmente durante 07 dias) em condições de umidade adequadas, verificando-se o seu progressivo endurecimento.

A estabilização de solos com cal é bastante similar à estabilização com cimento, no que se refere à avaliação de desempenho e aos métodos construtivos. A principal diferença entre as misturas solo-cimento e solo-cal consiste na velocidade de aumento de resistência observada nos dois processos: nas misturas solo-cimento a resistência cresce bastante em curto espaço de tempo, enquanto nas misturas solo-cal, os resultados são distribuídos ao longo do tempo de cura. Além disso, como as reações nas misturas solo-cal não se processam de forma tão imediata como nas misturas solo-cimento, os atrasos no processo de compactação são menos preocupantes para o processo de estabilização com cal que para os processos que utilizam o cimento como estabilizante (GONDIM, 2008).

Diversos autores elencam os principais fatores que afetam a resistência da mistura solo-cimento, entre eles estão:

- a) Tipo de solo: se o solo é bem graduado, são numerosas as áreas de contato, produzindo uma ação cimentante mais forte. Entretanto, solos argilosos podem exigir um elevado percentual de cimento na mistura e ficar muito oneroso, além de apresentar possibilidade de retração (MACÊDO, 2004). A Figura 9 apresentada a seguir, mostra o efeito do teor de cimento na resistência de diversos tipos de solo;

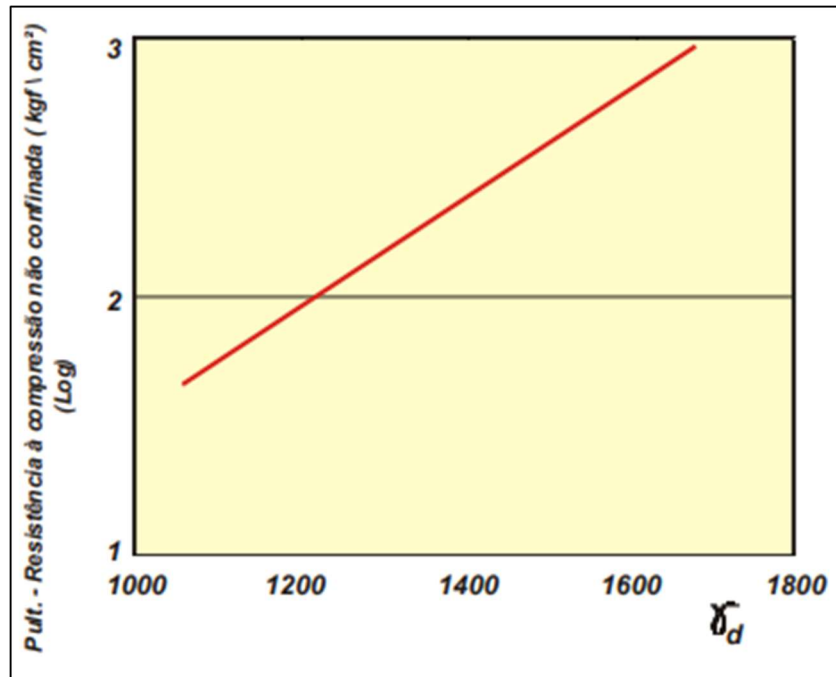
Figura 9 - Efeito do teor de cimento na resistência para vários tipos de solo.



Fonte: Enamorado (1990) *apud* Macêdo (2004).

- b) Teor de cimento: Qualquer tipo de cimento pode ser empregado na estabilização de solos, entretanto, o mais comum é o cimento tipo Portland. A resistência da mistura solo-cimento cresce de maneira aproximadamente linear para um mesmo tipo de solo. A escolha da porcentagem de cimento empregada dependerá do tipo de solo, sendo que quanto mais fino for o solo, maior será o teor de cimento exigido para modificar significativamente suas propriedades (ENAMORADO, 1990 *apud* MACÊDO, 2004);
- c) Segundo Ingles e Metcalf (1972), para qualquer tipo de solo, o máximo desenvolvimento do processo cimentante é obtido quando a mistura de solo com cimento e água está altamente compactada com um teor de umidade que facilite essa compactação e a hidratação do cimento. A compactação com a chamada umidade ótima, proporciona a densidade seca máxima da mistura. A Figura 10 mostra a relação entre o peso específico aparente seco (γ_d) e a resistência à compressão não-confinada (P_{ult}) (escala log) do solo estabilizado;

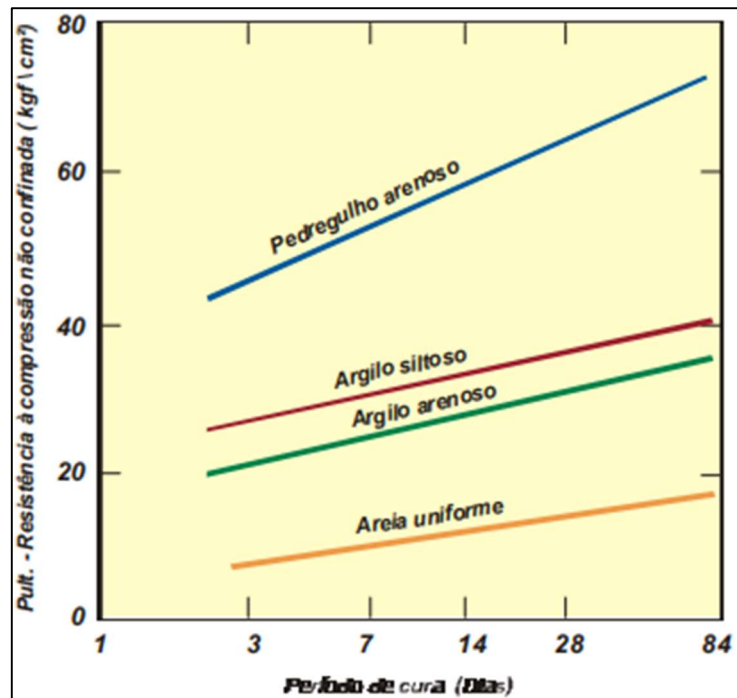
Figura 10 - Variação do logaritmo da resistência (P_{ult}) x γ_d .



Fonte: Enamorado (1990) *apud* Macêdo (2004).

- d) Quanto ao tempo e temperatura de cura, segundo Enamorado (1990) citado por Macêdo (2004), a resistência da mistura solo-cimento-água aumenta gradualmente com o tempo de cura, sendo que dos 28 dias aos 90 dias, as resistências máximas são alcançadas. Depois de 90 dias de cura, os aumentos na resistência são desprezíveis. As temperaturas elevadas podem resultar em incrementos significativos de resistência, entretanto, vale ressaltar que a secagem em excesso da mistura pode resultar em fissuras ou rupturas, dependendo do teor de cimento adotado (INGLES E METCALF, 1972). A Figura 11 mostra a variação na resistência da mistura em relação ao período de cura. Verifica-se que dentro dos primeiros 7 dias de cura já se pode observar um ganho considerável de resistência;

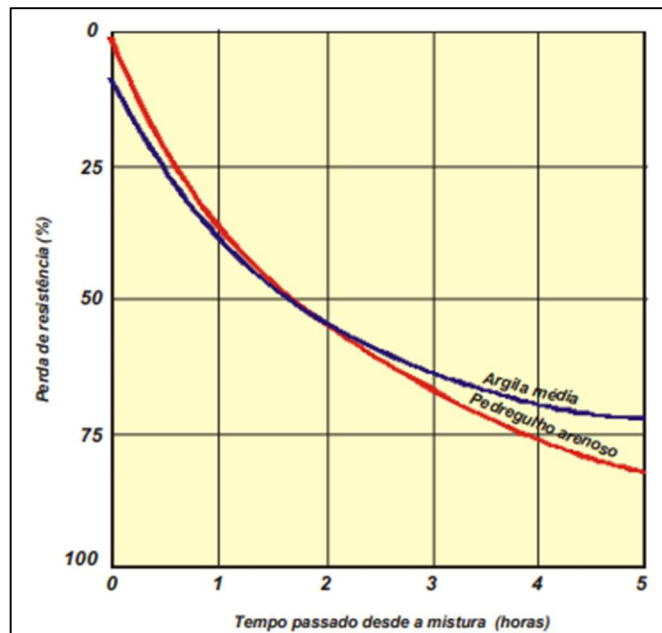
Figura 11 - Aumento da resistência em função do período de cura do cimento.



Fonte: Enamorado (1990) *apud* Macêdo (2004).

- e) Quanto ao tempo para compactação, segundo Enamorado (1990) citado por Macêdo (2004), a demora para compactar a mistura é a maior causa de perda de resistência do solo-cimento. A compactação é dificultada com o endurecimento da mistura, e ao final do processo a densidade é menor. Por isso, durante a execução desse tipo de estabilização, o uso de retardadores de pega pode ser implementado. A Figura 12 demonstra a porcentagem de queda de resistência de misturas em função do tempo passado desde a mistura.

Figura 12 - Queda na resistência em função do tempo passado desde a mistura.



Fonte: West (1959) *apud* Macêdo (2004).

2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

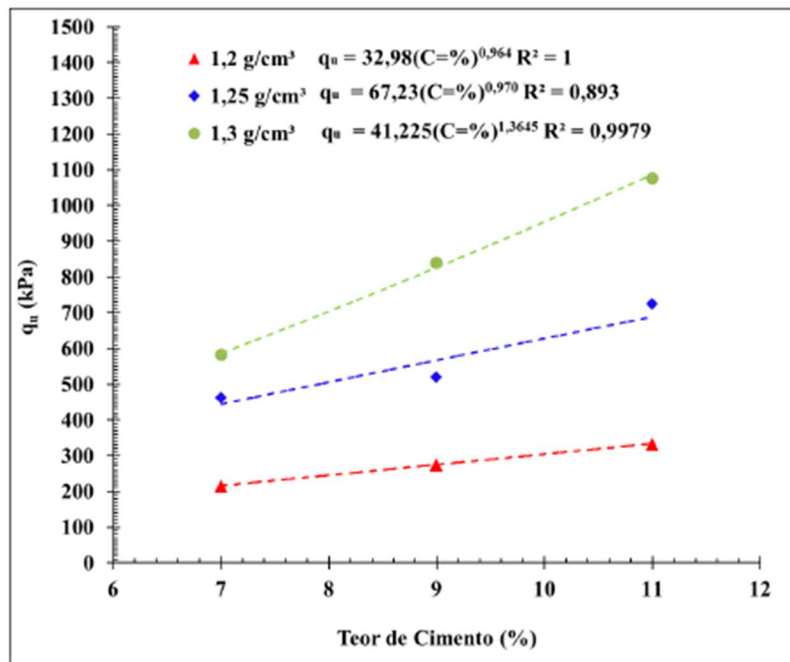
De acordo com a norma 004/94 – Determinação da Compressão Simples de Amostras Indeformadas, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (DNER, 1994), a resistência à compressão de um solo coesivo é o valor da pressão correspondente à carga que rompe um corpo de prova cilíndrico de solo submetido à carregamento axial.

Segundo Mafra (2018), o ensaio de compressão simples (ou ensaio não confinado) é utilizado para corpos de prova compostos por solos coesivos uma vez que a amostra não é submetida à tensão confinante durante a realização do ensaio, que se procede com a aplicação de uma carga axial (σ_1) de compressão no corpo de prova, enquanto a carga de confinamento (σ_3) permanece nula.

Os resultados do ensaio de compressão simples proporcionam noções da resistência do solo ou da mistura que se deseja avaliar. No caso de solos estabilizados, é possível avaliar a influência de diferentes dosagens de cimento na mistura, por exemplo. Ou ainda, caso se tenha interesse em adicionar outros elementos na composição de um solo estabilizado, é possível avaliar a influência da incorporação do mesmo em diferentes porcentagens, observando as variações no parâmetro de resistência à compressão simples.

No ramo da construção civil inúmeros estudos de resistência à compressão simples foram realizados com o objetivo de se avaliar a incorporação de resíduos em composições de solo. Martins (2019), estudou parâmetros de resistência à compressão de uma mistura de resíduo de mineração de bauxita com diferentes variações de massa específica aparente seca e porcentagens de cimento. Para todas as dosagens de cimento testadas (7%, 9% e 11%) foi possível observar alta influência da densidade dos corpos de prova e do teor de cimento nos resultados encontrados. Os valores mínimos encontrados, para densidade de 1,2 g/cm³ e 7% de cimento ficam em torno de 220 kPa, enquanto que valores de 1080 kPa foram obtidos para densidade de 1,3 g/cm³ e 11% de cimento, conforme mostrado na Figura 13 apresentada a seguir.

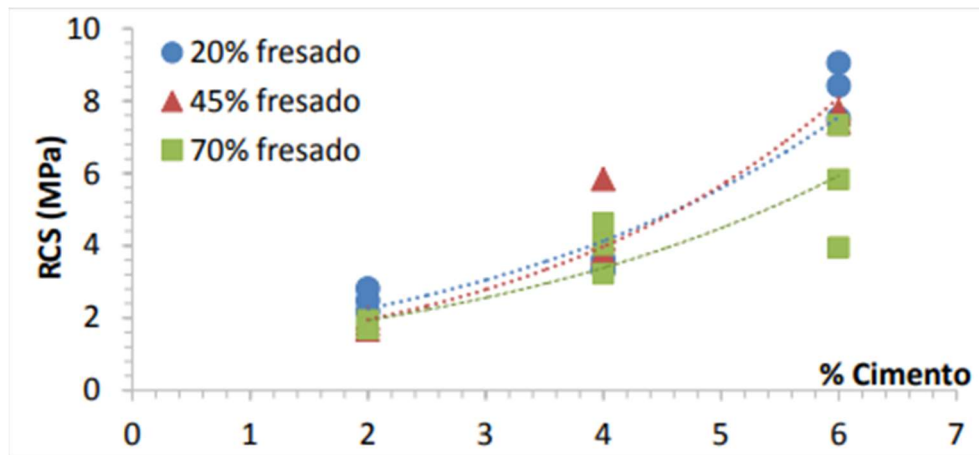
Figura 13 - Variação da resistência à compressão simples em função do teor de cimento.



Fonte: Martins (2019).

Visando a reutilização de pavimentos degradados, Azevedo *et al.* (2017) avaliaram a resistência à compressão simples de material fresado de pavimentação com adição de cimento Portland. As porcentagens de material fresado nas misturas foram de 20, 45 e 70%, com teores de cimento de 2, 4 e 6%. Os resultados apontaram que o teor de cimento causou um aumento exponencial da resistência à compressão das misturas, enquanto que o teor de fresado causou uma queda na resistência, conforme consta na Figura 14.

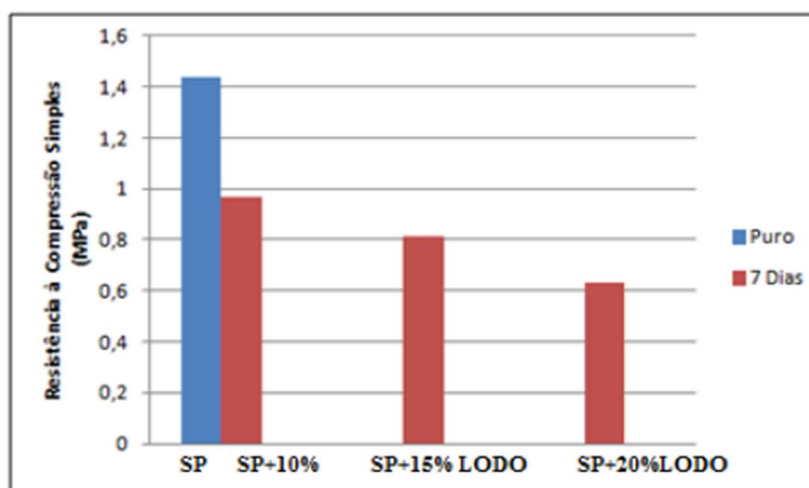
Figura 14 - Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento e porcentagem de material fresado de pavimentação.



Fonte: Azevedo *et al.* (2017).

Oliveira (2010), por sua vez, apresentou um estudo considerando a adição de lodo de estação de tratamento de efluentes em uma mistura com solo granular. O autor identificou diferentes valores de resistência à compressão simples, de acordo com o percentual de lodo empregado na mistura. Os resultados apresentados na Figura 15 mostram que para misturas com frações de 20% de lodo, as resistências obtidas são menos da metade das resistências obtidas com o solo granular puro.

Figura 15 - Variação da resistência à compressão simples em função de porcentagens de lodo.



Fonte: Oliveira (2019).

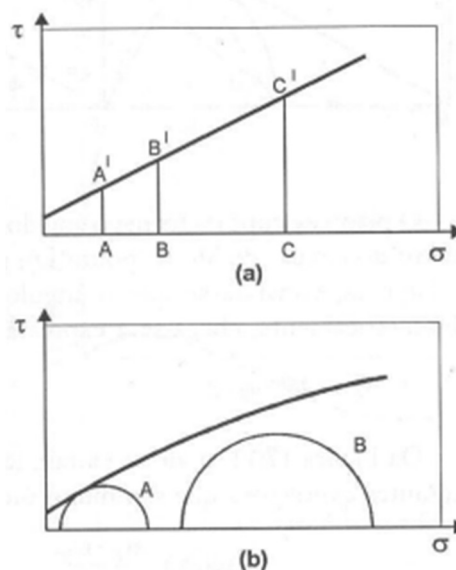
2.5 CISALHAMENTO DIRETO

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida pela máxima tensão de cisalhamento que um solo pode resistir antes da ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que estiver ocorrendo a ruptura. O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre as partículas do solo. Os principais fenômenos que influenciam no cisalhamento dos solos são o atrito e a coesão (LAMBE, 1972; VARGAS, 1977; PINTO, 2000).

Existem diversas formulações que buscam refletir o comportamento dos solos até o momento de sua ruptura por cisalhamento. Segundo Pinto (2000), os critérios que representam de forma mais adequada o comportamento dos solos é o de Coulomb e Mohr, que utilizam como base o estado de tensões.

Ainda segundo Pinto (2000), o critério de Coulomb diz que não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar o valor dado pela expressão $c + \phi \cdot \sigma$, sendo c a coesão, ϕ o coeficiente de atrito e σ a tensão normal no plano de cisalhamento. Similar ao proposto por Coulomb, o critério de Mohr diz que não há ruptura do solo enquanto o círculo que representa o estado de tensões aplicadas não atingir a chamada envoltória de resistência ao cisalhamento, que é basicamente a envoltória dos círculos relacionados ao estado de ruptura, obtidos experimentalmente para cada material. A Figura 16 apresenta a representação dos critérios de ruptura descritos anteriormente.

Figura 16 - Representação dos critérios de ruptura de Coulomb (a) e Mohr (b).

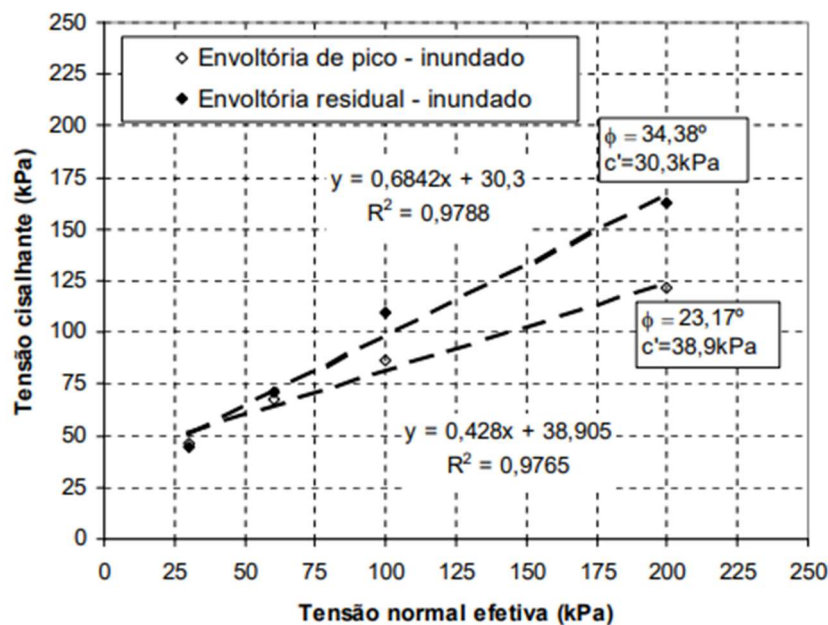


Fonte: Pinto (2000).

Existem vários métodos para determinar a coesão e o ângulo de atrito do solo, como correlações empíricas com resultados de ensaios de campo, métodos de retroanálise e ensaios de laboratório específicos, sendo estes últimos comumente utilizados para realização de projetos geotécnicos. O ensaio de cisalhamento direto é o um ensaio de laboratório frequentemente utilizado para este fim, em função de sua simplicidade e menor custo. Caracteriza-se pela aplicação de uma tensão normal em um plano e verificação da tensão cisalhante que provoca a ruptura, podendo esta ser representada em função do deslocamento no sentido que resulta na ruptura (HACHICH *et al.*, 1998). A grande limitação do ensaio está na imposição de um plano de ruptura para a avaliação da tensão cisalhante máxima.

Diversos estudos foram realizados utilizando o ensaio de cisalhamento direto com o propósito de se avaliar comportamentos de solos para fins específicos. Viecili (2003), desenvolveu um estudo com o intuito de se verificar a resistência ao cisalhamento direto de um solo de Ijuí-RS visando a sua utilização como suporte de fundações superficiais. Para isso foram realizados ensaios em condições inundadas e com a umidade natural. Observou-se um padrão de valores de ângulo de atrito para o solo, em torno de 20° a 23° e diminuição da coesão de aproximadamente 73% para a condição inundada. Para ilustrar o estudo desenvolvido por Viecili (2003), apresenta-se a Figura 17 com os valores da envoltória de resistência obtidos para o solo de estudo em condição inundada.

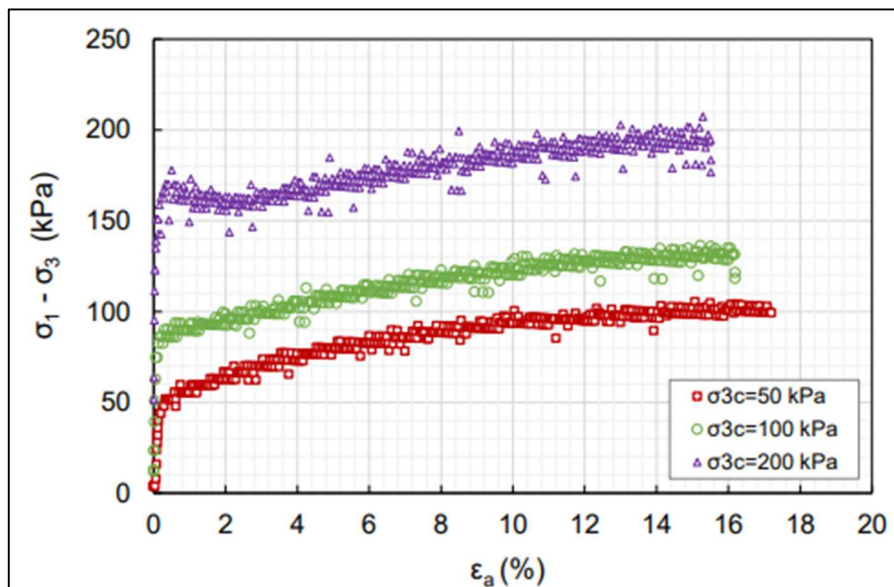
Figura 17 - Envoltória de resistência na condição inundada de um solo de Ijuí-RS.



Fonte: Viecili (2003).

No campo do reaproveitamento de resíduos na construção civil, foi desenvolvido um estudo por Moltalvan (2016), que utilizou o ensaio triaxial para avaliar o comportamento geotécnico de mistura de solo arenoso com lodo de estação de tratamento de água do município de Cubatão-SP. Foi observado um aumento no ângulo efetivo de atrito das misturas, enquanto que a coesão efetiva apresentou diminuição à medida que a proporção de lodo acrescentado ao solo aumentou, conforme apresentado na Figura 18. De modo geral, as características e propriedades das misturas apresentaram valores aceitáveis para solos utilizáveis em aterros o que possibilita o aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo a serem empregadas em obras geotécnicas.

Figura 18 - Resultado do ensaio triaxial para uma mistura de lodo de ETA com solo.



Fonte: Moltalvan (2003).

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Nesse capítulo serão descritos os materiais e procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, bem como os critérios e particularidades adotados para o estudo das propriedades físicas dos materiais. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC – Campus Joinville.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados durante o desenvolvimento da presente pesquisa são constituídos por um solo residual do município de Joinville, lodo têxtil de indústria do município de Joinville, água e cimento. Nos subitens a seguir, os materiais utilizados serão propriamente apresentados.

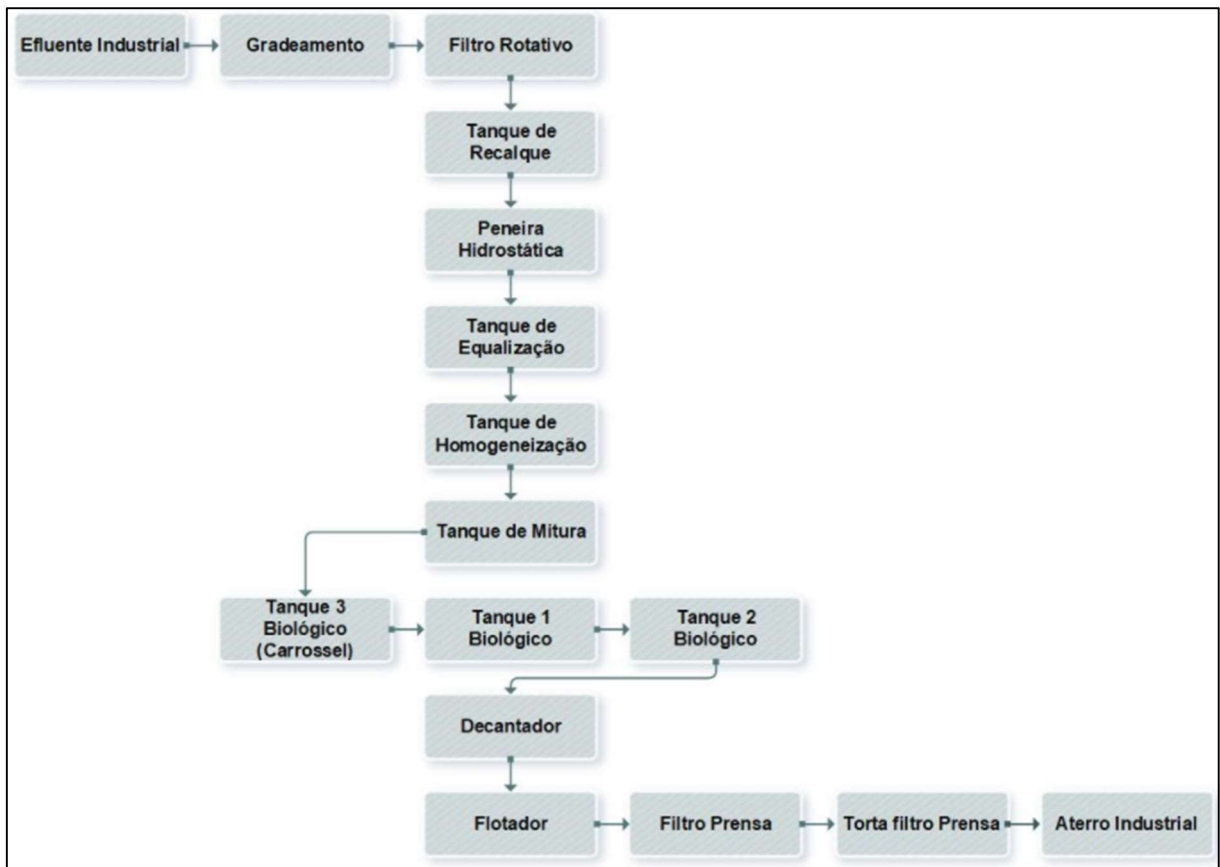
3.1.1. Lodo têxtil

O resíduo de lodo têxtil foi coletado em uma empresa do setor têxtil localizada no município de Joinville – SC. O lodo em questão é originado a partir do sistema de tratamento de efluentes da empresa, que utiliza os métodos de lodos ativados e coagulação/flotação. O fluxograma apresentado na Figura 19 demonstra os processos de tratamento que originam o lodo têxtil utilizado no presente trabalho.

Antes de ser transportado para aterros industriais da região, o lodo é depositado em caçambas localizadas na saída do sistema de tratamento de efluentes, para que percam parte da água de sua composição. A coleta desse material foi feita nessas caçambas em dois momentos distintos. O lodo da primeira coleta foi espalhado em uma bandeja e seco ao ar por aproximadamente dois meses até o início da realização dos ensaios. O lodo da segunda coleta também foi disposto em uma bandeja e seco ao ar por aproximadamente uma semana.

Para a realização dos ensaios o lodo foi destorroado e deixado em estufa a uma temperatura de aproximadamente 60°C por aproximadamente 2 dias. Optou-se pela secagem do lodo à uma temperatura abaixo dos 100°C, para que não ocorresse eventual queima da matéria orgânica presente na sua composição.

Figura 19 - Fluxograma do tratamento do efluente têxtil.



Fonte: empresa fornecedora do lodo têxtil (2021).

As Figuras 20 e 21 mostram respectivamente o lodo utilizado na presente pesquisa, seco ao ar e após a secagem na estufa e preparação para a mistura.

Figura 20 - Lodo têxtil seco ao ar.



Fonte: autor (2021).

Figura 21 - Lodo têxtil após secagem em estufa, preparado para mistura.



Fonte: autor (2021).

Com o objetivo de verificar se existe a possibilidade do ponto de vista legal de se utilizar o resíduo do lodo têxtil utilizado no presente estudo em composições de solo-cimento dispostas na natureza, foi fornecida pela empresa geradora do resíduo a análise química do material, incluindo as concentrações dos componentes químicos em comparação com a NBR 10004/2004, que contém as diretrizes para classificação dos resíduos sólidos.

A classificação do resíduo é feita a partir da avaliação de parâmetros referentes à inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Caso o mesmo não apresente estas características, pode ser considerado de Classe II, de acordo com a NBR 10004/2004. O procedimento para verificação destas propriedades, é a avaliação das concentrações dos seus constituintes químicos, em comparação com os parâmetros dispostos no Anexo G da norma citada, para se determinar se o resíduo é inerte ou não-inerte.

A partir dos dados fornecidos pela empresa têxtil, é apresentado o Quadro 1 disposto a seguir, com as concentrações de alguns dos parâmetros avaliados nos ensaios de caracterização química.

Com base nos valores máximos permitidos ABNT NBR 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação, e a comparação dos resultados apresentados no relatório fornecido, o resíduo é classificado como Classe II A – Não perigoso, não inerte, o que corrobora com a possibilidade de reuso do material.

Quadro 1 - Resultados do ensaio de caracterização química do resíduo.

Ensaio	Resultado	Unidade	NBR 10004 - Resíduos sólidos
Reatividade	Ausência	-	Ausência
Corrosividade	8,3	-	2,0 a 12,5
Matéria orgânica	45,08	%	-
Cianeto	< 1	mg/kg	Máx. 250,0 mg/kg
Sulfeto de Hidrogênio	< 0,200	mg/L	Máx. 500,0 mg/L
Fluoretos	0,5	mg/L	Máx. 150,0 mg/L
Arsênio	< 0,008	mg/L	Máx. 1,0 mg/L
Mercúrio	< 0,0010	mg/L	Máx. 0,1 mg/L
Bário	0,168	mg/L	Máx. 70 mg/L
Cromo	< 0,005	mg/L	Máx. 5,0 mg/L

Fonte: empresa fornecedora do lodo (2021).

3.1.2. Solo

A Figura 22 apresenta o solo que foi utilizado nesta pesquisa, o mesmo foi coletado em uma obra localizada na Rua Aracajú, bairro Santo Antônio em Joinville – SC. A obra em questão trata-se de um edifício residencial, e na época da coleta do material, a obra ainda estava nas fases iniciais, onde estavam sendo realizadas escavações para execução das fundações, por isso o solo estava exposto, o que facilitou a retirada do material. A Figura 23 apresenta um croqui de localização da obra em que foi coletado o solo. O intuito da escolha deste material, foi trabalhar com uma amostra de solo residual típico da região de Joinville-SC, o qual poderia ser utilizado em obras de infraestrutura (aterros/ pavimentação).

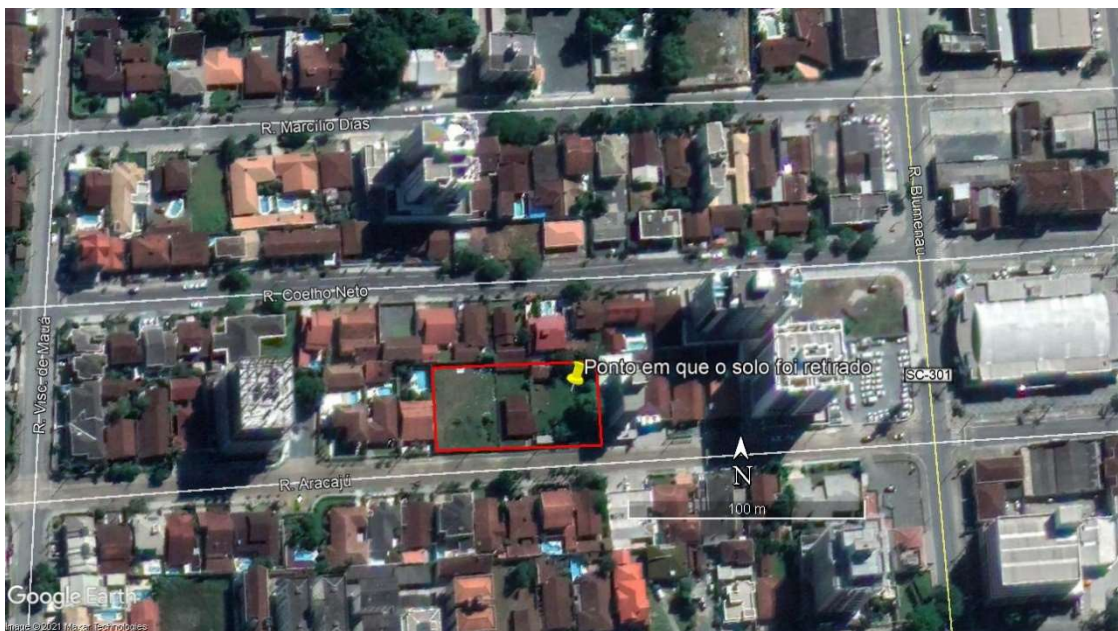
Similar ao lodo têxtil, o solo foi recolhido com uma pá e guardado em grandes sacos plásticos. Para realização dos ensaios, primeiramente o solo foi seco ao ar e posteriormente em estufa a uma temperatura de 60°C, juntamente com o lodo.

Figura 22 - Solo utilizado na pesquisa.



Fonte: autor (2021).

Figura 23 - Croqui de localização da obra em que o solo foi coletado.



Fonte: Google Earth, 2021.

3.1.3. Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o CP V-ARI (Figura 24), adquirido diretamente da fábrica da empresa Itambé, em Itajaí – SC e disponível junto ao Laboratório Materiais do curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville. De acordo com os relatórios de ensaios disponibilizados pela empresa, o mesmo atende à norma da ABNT NBR 16697:2018 (ABNT, 2018), que determina os requisitos

desejáveis dos cimentos (ITAMBÉ, 2021). Optou-se pela escolha do cimento tipo CP V-ARI, pois de acordo com Pugliesi (2019), o mesmo adquire elevada resistência à compressão nos primeiros dias de cura, sendo recomendado para aplicações que exigem resistência inicial elevada.

Figura 24 - Cimento utilizado na pesquisa.



Fonte: autor (2021).

Durante a realização dos ensaios, o cimento foi acondicionado em sacos plásticos bem fechados, no laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC - Campus Joinville, para evitar reações com a umidade do ar e ocorrência de hidratação.

3.1.4. Água destilada.

Para fins laboratoriais, a água destilada é utilizada de modo a estabelecer uma condição padrão para todos os ensaios executados. Para os procedimentos desenvolvidos neste trabalho, incluindo a composição das misturas, a água destilada utilizada foi obtida por meio do destilador presente no Laboratório de Mecânica dos Solos.

3.2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da presente pesquisa foram realizados ensaios de caracterização do solo e do lodo têxtil, além de avaliação da resistência à compressão simples

e cisalhamento direto de misturas desses materiais com adição de cimento. Todos os procedimentos dos ensaios citados foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville-SC.

3.2.1. Programa experimental.

O programa experimental consiste na realização dos ensaios visando a obtenção de resultados referentes à influência da adição de diferentes porcentagens de lodo têxtil em uma mistura de solo-cimento, no que diz respeito à resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento direto.

Para a obtenção dos resultados, é possível dividir o programa experimental em diversas etapas. Primeiramente, foi realizada a caracterização geotécnica do solo e do lodo têxtil, incluindo ensaio de densidade real dos grãos, limites de Atterberg (LL e LP), granulometria e ensaio de compactação (Proctor Normal). A próxima etapa consistiu na dosagem das misturas, que será apresentada no item subsequente. A partir das dosagens definidas, prosseguiu-se com a mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova pilotos e posteriormente, com a moldagem dos corpos de prova efetivamente utilizados no ensaio de compressão simples. Similarmente, foi realizada a mistura dos materiais e moldados os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, a partir das dosagens definidas. Com a realização dos ensaios de compressão simples e cisalhamento direto, os resultados foram coletados, sendo estes apresentados e discutidos no Capítulo 4.

A Tabela 3 apresentada a seguir, demonstra as etapas desenvolvidas no programa experimental e as respectivas normas utilizadas como referência aos procedimentos de ensaio.

Tabela 3 - Apresentação dos ensaios executados e respectivas normas de referência.

ETAPA	MATERIAL	ENSAIO	NORMA REFERÊNCIA
Caracterização dos materiais	Lodo Têxtil	Granulometria	NBR 7181/2016
		Limite de liquidez	NBR 6459/2016
		Limite de plasticidade	NBR 7180/2016
		Massa específica real dos grãos	DNER-ME 093/1994
	Solo	Granulometria	NBR 7181/2016
		Limite de liquidez	NBR 6459/2016
		Limite de plasticidade	NBR 7180/2016
		Massa específica real dos grãos	DNER-ME 093/1994
		Compactação	NBR 7182/2016
Determinação da resistência à compressão simples	Mistura de solo, lodo têxtil, água e cimento	Resistência à compressão simples	NBR 7215/2009, NBR 5738/2015 e ASTM C39-10
Determinação da resistência ao cisalhamento direto	Mistura de solo, lodo têxtil, água e cimento	Cisalhamento direto	ASTM D3080/2004

Fonte: autor (2021).

3.2.2. Caracterização geotécnica dos materiais.

Conforme descrito na Tabela 3, a granulometria dos materiais foi obtida seguindo-se os procedimentos ditados pela norma NBR 7181/2016. Foram realizados os ensaios de sedimentação, peneiramento fino e peneiramento grosso a fim de obter a curva granulométrica completa dos materiais. Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade seguiram a norma NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente. A massa específica real dos grãos do solo e do lodo têxtil foram determinadas a partir da execução do ensaio de acordo com a

norma DNER-ME 093/1994, método do picnômetro, e o ensaio de compactação foi executado no solo, seguindo a NBR 7182/2016. As Figuras 25, 26, 27 e 28 apresentadas a seguir mostram algumas etapas dos ensaios de caracterização realizados, a saber: ensaio de sedimentação (Figura 25), ensaio para determinação da densidade real dos grãos (Figura 26), preparação do lodo para ensaios de LL (Figura 27) e corpo de prova moldado durante o ensaio de compactação do solo (Figura 28).

Figura 25 - Ensaio de sedimentação.



Fonte: autor (2021).

Figura 26 - Ensaio da massa específica real dos grãos.



Fonte: autor (2021).

Figura 27 - Lodo têxtil com água para ensaio do limite de liquidez.



Fonte: autor (2021).

Figura 28 - Desmoldagem após o ensaio de compactação.



Fonte: autor (2021).

3.3 DOSAGEM

O método de dosagem adotado para a moldagem dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão simples e cisalhamento direto, foi feito através da inserção de determinadas porcentagens de cimento e lodo têxtil em substituição à porcentagem de solo em peso seco. A porcentagem de cimento adicionada foi adotada como a mínima possível, levando

em consideração a economia das misturas avaliadas, tomando-se como requisito a manutenção da integridade dos corpos de prova durante todas as etapas dos ensaios.

Para determinação das proporções de solo, lodo têxtil, cimento e água, primeiramente foi necessária a definição do valor do peso específico aparente seco (γ_d) que seria adotado para as misturas. Com o propósito de se utilizar a combinação dos materiais que apresentasse menor índice de vazios, menor permeabilidade, menor compressibilidade e conseqüentemente melhor resposta às solicitações externas, no que diz respeito à sua resistência, para a dosagem dos materiais foi utilizado o peso específico aparente seco máximo do solo e a umidade ótima, obtidos a partir do ensaio de Proctor Normal.

O próximo procedimento adotado para determinação da dosagem das misturas, foi a definição do volume total (Vt) esperado para os corpos de prova após a moldagem. Esta determinação foi possível, conhecendo-se as dimensões do molde cilíndrico utilizado na moldagem. Com a definição do volume total de cada corpo de prova, foi possível determinar a massa de solo nas condições de umidade ótima (Wt) (definida pelo ensaio de compactação) necessária para compor este volume. Descontando-se o teor de umidade, tem-se a massa de solo seco ($W_{s,solo}$) necessária para moldagem de um corpo de prova. A partir desta massa pode-se definir as massas de lodo têxtil e cimento a ser utilizadas, a partir de frações pré-determinadas, em substituição da massa de solo seco nas misturas, conforme equações 3.1 e 3.2. A massa do solo seco total na mistura foi mantido constante, mas sendo composto também pelas quantidades de cimento e lodo adotadas, conforme apresentado na equação 3.3. A massa de água (W_w) das misturas também foi determinada em função da soma das massas de solo, cimento e lodo, conforme Equação 3.4.

$$W_{s,ci} = C * W_{s,solo} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$W_{s,ci}$ = Massa de cimento (g);

$W_{s,solo}$ = Massa de solo seco (g);

C = teor de agente cimentante (%);

$$W_{s,l} = L * W_{s,solo} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$W_{s,l}$ = Massa de lodo têxtil (g);

$W_s, \text{ solo}$ = Massa de solo seco (g);

C = teor de lodo têxtil (%);

$$W_{s, \text{ solo}} = \frac{V_t \times \gamma_d}{(1 + C + L)} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

$W_s, \text{ solo}$ = Massa de solo seco (g);

V_t = Volume total (cm³);

γ_d = Massa específica aparente seca do solo (g/cm³);

C = teor de agente cimentante (%);

L = teor de lodo têxtil (%);

$$W_w = w * (W_s, \text{ solo} + W_s, \text{ ci} + W_s, \text{ l}) \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

W_w = Massa de água (g);

w = teor de umidade ótima (%);

$W_s, \text{ solo}$ = Massa de solo (g);

$W_s, \text{ ci}$ = Massa de cimento (g);

$W_s, \text{ l}$ = Massa de lodo têxtil (g);

Para compor as dosagens adotadas para o ensaio de resistência à compressão simples, foram feitos experimentos testes, com 15% de lodo têxtil, e teores de cimento variando em 3%, 5% e 7%. Após a moldagem dos corpos de prova testes, respeitou-se um período de 7 dias de cura sendo que nas últimas 12 horas antes da execução do ensaio de compressão simples os corpos de prova testes foram imersos em água com o objetivo de se reduzir as forças de sucção, que podem trazer parâmetros falsos de resistência. Além disso, objetivou-se realizar todos os ensaios em misturas na condição de total saturação, de modo a simular o comportamento dos materiais em condições mais críticas, quando da possível aplicação em obras de infraestrutura.

Verificou-se que todos os corpos de prova com diferentes teores de cimento permaneceram íntegros após imersão em água por 12 horas, sendo possível a realização dos ensaios. Diante disso, visando a mistura solo-cimento-lodo mais econômica possível, foi adotado o teor fixo de 3% de agente cimentante para as dosagens das amostras.

As frações de lodo têxtil empregadas na dosagem das amostras para compressão simples variam em 0%, 5%, 10% e 15%. Estes valores foram determinados observando que em pesquisas realizadas por outros autores, frações maiores do que 20% desse material configuravam amostras instáveis. Tratando-se dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, os mesmos foram moldados a partir do cilindro pequeno de compactação de Proctor. As dosagens utilizadas para este ensaio englobam 3 misturas, todas com 3% de cimento e teores de lodo variando entre 0%, 5% e 10%. A porcentagem de 15% de lodo não foi adotada para os ensaios de cisalhamento, pelo baixo desempenho da mistura observada durante os ensaios de compressão simples.

Em resumo, as dosagens utilizadas para o ensaio de compressão simples envolvem porcentagens de lodo em substituição a massa de solo de 0%, 5%, 10% e 15% e para o ensaio de cisalhamento direto as porcentagens de lodo têxtil foram de 0%, 5% e 10%. As misturas levaram em consideração o teor de cimento de 3%, e posteriormente após verificação de baixos valores de resistência para as misturas com 15% de lodo nos ensaios de resistência à compressão simples, optou-se por realizar ensaios em amostras com 7% de cimento e 15% de lodo, afim de se verificar se atingiriam resistências mais altas, inibindo a influência do lodo no que diz respeito ao desenvolvimento de resistência.

Os Quadros 2 e 3 mostram as dosagens empregadas para os ensaios de compressão simples e cisalhamento direto. Ressalta-se que na separação das quantidades finais de cada material para a moldagem do corpo de prova, foi considerado 15% a mais de todas as quantidades especificadas nos Quadros 1 e 2, a fim de ter material disponível para verificação da umidade das misturas.

Quadro 2 - Dosagem do ensaio de compressão simples.

Ci (%)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	LODO (%)	V _T (cm ³)	W _s (g)	W _s (solo)	W _s (ci)	W _s (lodo)	W _w (g)	W _T (g)
3	1,49	25	0	196,35	292,56	284,04	8,52	0,00	73,14	365,70
3	1,49	25	5	196,35	292,56	270,89	8,13	13,95	73,24	366,21
3	1,49	25	10	196,35	292,56	258,90	7,77	26,67	73,33	366,67
3	1,49	25	15	196,35	292,56	247,93	7,44	38,31	73,42	367,10

Fonte: autor (2021).

Quadro 3 - Dosagem do ensaio de cisalhamento direto.

Ci (%)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	LODO (%)	V (cm ³)	W (g)	W (solo)	W (ci)	W _s (lodo)	W (g)	W (g)
3	1,49	25	0	997,46	1486,21	1442,92	43,29	0,00	371,55	1857,76
3	1,49	25	5	997,46	1486,21	1376,12	41,28	70,87	372,07	1860,34
3	1,49	25	10	997,46	1486,21	1315,23	39,46	135,47	372,54	1862,69

Fonte: autor (2021).

3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Para o procedimento de elaboração dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples, foi utilizado um molde bipartido metálico, conforme mostrado na Figura 29. O conjunto que compõe este molde é composto por três partes: base, corpo e topo. O corpo do molde foi confeccionado em forma cilíndrica em duas partes, com o objetivo de facilitar o processo de desmoldagem do corpo de prova. A base traz maior estabilidade ao processo de moldagem pois possui uma “abertura” para o encaixe do corpo do molde. O topo, serve como elemento de fixação do cilindro bipartido, mantendo as duas partes do corpo unidas durante a etapa de moldagem. Com esse molde foram moldados 39 corpos de prova com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Figura 29 - Molde utilizado para elaboração dos corpos de prova.



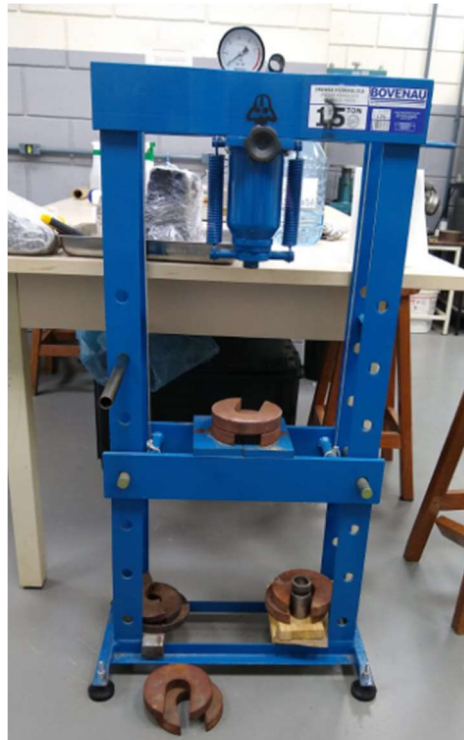
Fonte: autor (2021).

Inicialmente as quantidades em massa de solo, lodo, cimento e água, definidas através da planilha de dosagem apresentada no item 3.3, foram separadas e misturadas adequadamente. Num primeiro momento foram misturados os materiais secos e posteriormente adicionou-se a água, misturando-se até a sua completa homogeneização, evitando a formação de grumos de solo que poderiam reter água. Com o objetivo de obter um controle maior sobre a mistura e possíveis perdas de umidade ao ambiente, foram misturadas porções de materiais suficientes para moldagem de no máximo 3 corpos de prova por vez.

A quantidade total da mistura necessária para compor um corpo de prova foi dividida em três camadas, para facilitar o processo de compactação e permitir uma maior homogeneidade ao longo do volume do corpo de prova. A massa das três camadas foi pesada

separadamente e colocada em sacos plásticos fechados, para que não houvesse perda excessiva de umidade para o ambiente durante o processo de moldagem. O processo de compactação de cada uma das camadas, com altura definida de 33,33 mm, foi realizado com o auxílio de uma prensa manual do Laboratório de Mecânica dos Solos, apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Prensa utilizada para compactação dos corpos de prova.



Fonte: autor (2021).

Para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova, o molde cilíndrico bipartido foi lubrificado com vaselina. Depois de desmoldados, os corpos de prova foram devidamente pesados, foram realizadas três medições de altura e diâmetro e em seguida foram colocados em sacos plásticos fechados e identificados. Desse modo foi respeitado o período de cura do cimento de 7, 14 e 28 dias até a ruptura. As Figuras 31 e 32 mostram os corpos de prova moldados e colocados em sacos plásticos fechados para o período de cura do cimento.

Figura 31 - Corpos de prova moldados.



Fonte: autor (2021).

Figura 32 - Corpos de prova embaladas para o período de cura.



Fonte: autor (2021).

A ruptura dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de uma prensa utilizada para o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), na qual utilizou-se um anel dinamométrico, devidamente calibrado, para a obtenção da carga aplicada ao corpo de prova até o momento de sua ruptura. No topo dos corpos de prova foi colocada uma base cilíndrica, e acima dela uma esfera metálica com o propósito de garantir que a carga aplicada fosse igualmente distribuída na seção transversal dos corpos de prova. A Figura 33 apresenta o procedimento de ruptura de um corpo de prova.

Figura 33 - Prensa utilizada para romper os corpos de prova no ensaio de compressão simples.



Fonte: autor (2021).

Os resultados dos corpos de prova com 3% de cimento e 15% de lodo, apontaram resistência nulas aos 7 dias de cura, e resistências muito baixas aos 14 e 28 dias de cura, conforme será melhor detalhado no item 4. A partir disso, optou-se por realizar o ensaio de compressão simples empregando na mistura uma porcentagem de 7% de cimento e 15% de lodo com o intuito de se verificar se a adição de um teor mais significativo de cimento seria capaz de dar resistência à mistura, sobressaindo da inibição da resistência causada pela presença do lodo. Desse modo, foram moldados três corpos de prova com 7% de cimento e 15% de lodo, sendo estes rompidos aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados referentes ao ensaio de compressão simples são apresentados no item 4.

3.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para o estudo foi utilizado um equipamento de cisalhamento direto, conforme mostra a Figura 34, que permite a realização de ensaios com aplicação de uma carga normal e velocidade de deslocamento constante. As diretrizes para execução do ensaio foram determinadas pela norma norte-americana ASTM D3080, sendo o procedimento descrito a seguir.

Figura 34 - Equipamento para cisalhamento direto em solos.



Fonte: autor (2021).

O equipamento de cisalhamento direto é constituído por uma estrutura em aço que dá suporte ao sistema de movimentação e aplicação da carga do cisalhamento da amostra, pelo conjunto de aplicação de carga estática sobre a caixa de cisalhamento, pelo conjunto de cisalhamento, pelo conjunto de sensores e interface. O sistema de movimentação e aplicação da carga de cisalhamento da amostra, possibilita realização de ensaios com diferentes velocidades pré-determinadas, sendo estas constantes durante o cisalhamento. O conjunto para aplicação de carga estática sobre a amostra no interior da caixa de cisalhamento é constituído por um sistema de braço de alavanca e pesos que permite a aplicação de uma carga vertical constante sobre a amostra durante a realização do ensaio.

O conjunto de cisalhamento é constituído por uma caixa deslizante apoiada sobre uma esteira de rolamentos. O conjunto de sensores eletrônicos do equipamento é composto por sensores de deslocamento e célula de carga, os quais permitem o monitoramento digital na interface, dos deslocamentos ocorridos e da carga aplicada na amostra. A Figura 35 demonstra a caixa de cisalhamento na qual é inserido o corpo de prova para o ensaio. Observa-se, ainda, na Figura 35 a presença das pedras porosas que são posicionadas acima e abaixo do corpo de prova e o molde metálico de dimensões de 6 x 6 cm, utilizado para a moldagem do corpo de prova.

Figura 35 - Caixa de cisalhamento direto, com pedras porosas e molde metálico.



Fonte: autor (2021).

Para a obtenção dos corpos de prova para o ensaio do cisalhamento direto, primeiramente moldou-se um corpo de prova de maiores dimensões, utilizando-se o cilindro pequeno do ensaio de compactação (Proctor). Foram moldados 3 cilindros com dosagens de 3% de cimento e 0%, 5% e 10% de lodo, conforme apresentado no item 3.3.

Após um período de cura médio de aproximadamente 14 dias (período variável em função do tempo necessário para a realização do ensaio), foram moldados os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, com o auxílio do anel metálico quadrado biselado, de 6 centímetros de lado. De cada cilindro de compactação foram extraídos três corpos de prova. As Figuras 36 e 37 apresentam respectivamente o processo de obtenção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto e a sua montagem na caixa de cisalhamento.

Figura 36 - Processo de moldagem dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: autor (2021).

Figura 37 - Corpo de prova montado na caixa de cisalhamento.



Fonte: autor (2021).

Salienta-se que houve dificuldades na moldagem final do corpo de prova para o ensaio, sendo que eventuais perturbações ocasionadas nesta etapa podem ter afetado os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto realizado no material.

Para cada um dos três corpos de prova com a mesma dosagem, primeiramente foi realizada a etapa de adensamento. Nessa etapa, o corpo de prova foi colocado na caixa de cisalhamento e posicionado no equipamento, sendo inundado com água, com o intuito de eliminar as forças de atrito e sucção entre os grãos de solo, que podem fornecer falsos parâmetros de resistência da amostra. Para o presente estudo, os corpos de prova de uma mesma dosagem foram submetidos a tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, a fim de possibilitar a obtenção da envoltória de resistência dos materiais. O término do adensamento do corpo de prova foi determinado a partir do fim da variação nas deformações verticais significativas medidas pelo equipamento.

Depois de devidamente adensado, o corpo de prova no equipamento foi submetido ao ensaio de cisalhamento direto. Para este, foi estipulado um avanço da parte superior da caixa bipartida de 0,05 mm/min, sendo o avanço máximo definido como sendo de 8 mm (cerca de 13% da dimensão do corpo de prova). As leituras de resistência ao cisalhamento foram realizadas automaticamente pelo equipamento, e os dados gerados puderam ser convertidos em uma planilha do Excel, para posterior análise. A Figura 38 apresenta a caixa de cisalhamento aberta, com o corpo de prova, após a realização do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 38 - Caixa de cisalhamento aberta, com o corpo prova após a realização do ensaio.



Fonte: autor (2021).

4. RESULTADOS

Este capítulo tem como intuito apresentar os resultados obtidos por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e cisalhamento direto dos corpos de prova constituídos por solo residual de Joinville/SC, lodo têxtil, cimento e água.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO TÊXTIL

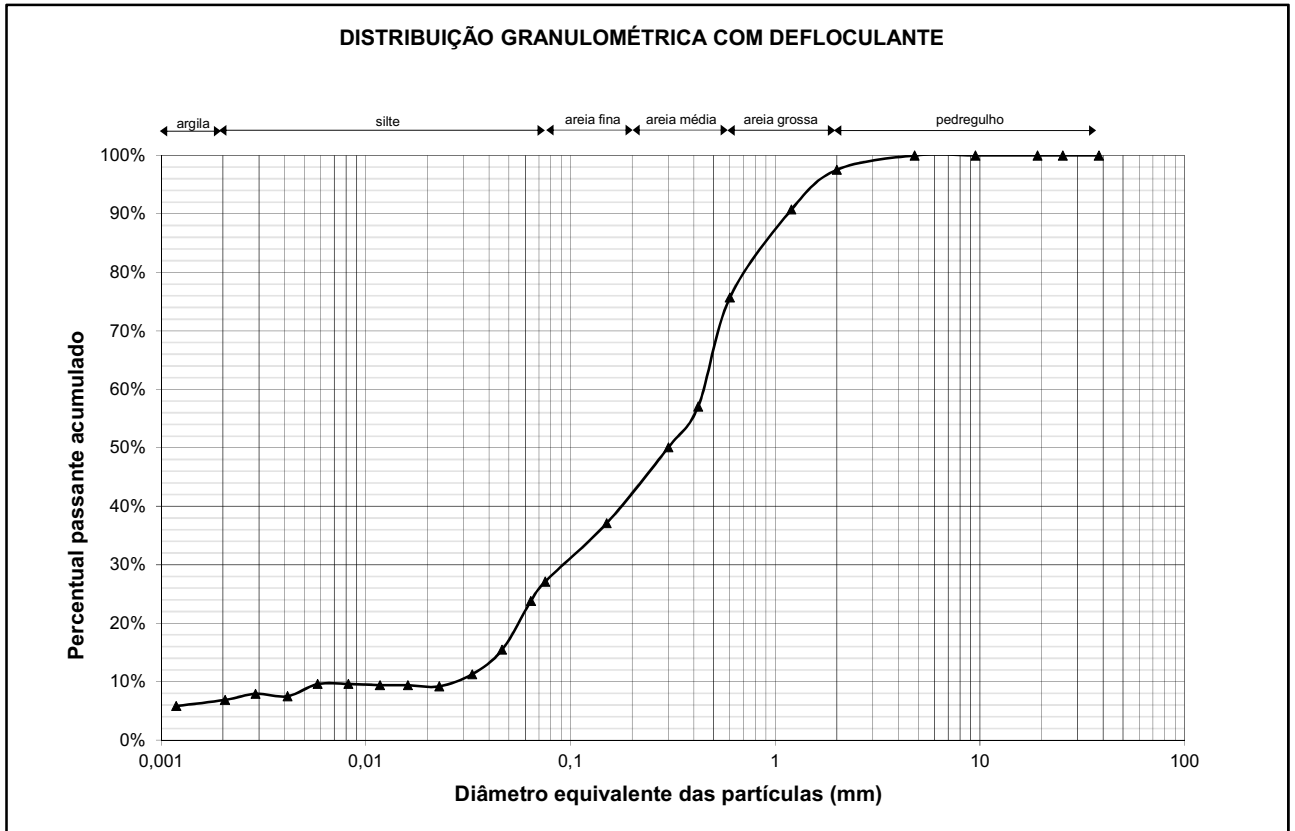
4.1.2 Caracterização física do lodo têxtil

Após duas tentativas de se realizar o ensaio de sedimentação com esse tipo de material, verificou-se que os resultados se apresentaram fortemente influenciados pela presença elevada de espuma após a agitação, mesmo após horas de decantação das partículas em suspensão. Provavelmente a presença de espuma após a agitação está relacionada com a composição do material (presença de matéria orgânica). A Figura 39 apresenta a curva granulométrica obtida para o lodo têxtil.

A partir da análise da curva apresentada, verifica-se que o lodo de estação de tratamento de efluentes têxteis utilizado na presente pesquisa quando avaliado sob os conceitos preconizados pela NBR6502 (ABNT, 1995), possui granulometria com pouca presença de partículas do tamanho de pedregulho (2,46 %), partículas do tamanho de areia grossa correspondem a 21,84%, do tamanho de areia média 25,64% e do tamanho de areia fina 22,95%. As partículas do tamanho de silte corresponde a uma porcentagem de 21,27% do total, e do tamanho de argilas representam 5,84%.

Para fins de comparação, o lodo de estação de tratamento de efluentes utilizado na pesquisa realizada por Kelm (2014), apresentou granulometria com predominância de partículas do tamanho de silte, com cerca de 59%. Já a granulometria encontrada por Oliveira (2014), para lodo têxtil, mostra uma concentração de cerca de 80% das partículas retidas pela peneira de abertura 2 mm. Desse modo, observa-se grande variação dos diâmetros das partículas encontrados em resultados da literatura.

Figura 39 - Curva granulométrica do lodo têxtil.



Fonte: autor (2021).

No Quadro 4, são mostrados os valores obtidos para os limites de liquidez e plasticidade, bem como umidade natural do lodo no momento em que foi coletado e massa específica real dos grãos. Atenta-se ao fato de o lodo têxtil apresentar elevada umidade, visto que a verificação do teor de umidade foi realizada com uma amostra logo após sua disposição nas caçambas, ao final do sistema de tratamento de efluentes, para serem secos ao ar. O alto valor do teor de umidade também tem relação à elevada presença de matéria orgânica em sua composição.

Quadro 4 - Índices físicos do lodo têxtil.

Massa específica real dos grãos	1,84 g/cm ³
Teor de umidade natural	156,21%
LL	Não plástico
LP	
IP	

Fonte: autor (2021).

Para a massa específica real dos grãos, foi encontrado o valor de $1,84 \text{ g/cm}^3$. Lucena (2012) encontrou valor para massa específica real dos grãos de lodo de estação de tratamento de efluentes de Recife-PE de $1,95 \text{ g/cm}^3$. Kelm (2014), encontrou valores de massa específica real dos grãos para lodo de estação de tratamento de efluentes de $1,68 \text{ g/cm}^3$. Desse modo, o valor encontrado de $1,84 \text{ g/cm}^3$ configura um valor intermediário, coerente com outros encontrados na literatura. Essas diferenças podem ser atribuídas às características dos efluentes de cada região, e também ao processo de tratamento que envolve a formação deste material, que acaba resultando em lodos com diferentes composições e características químicas e físicas.

Quanto aos ensaios para determinação dos limites de Atterberg, verificou-se que depois de seco em estufa à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e passado em peneira para realização dos ensaios, houve dificuldade para homogeneizar o lodo, quando adicionada a água junto ao material. O lodo apresentou comportamento não plástico, não sendo possível a realização dos ensaios para determinação do limite de liquidez e de plasticidade. Similar ao ocorrido na presente pesquisa, Kelm (2014) também definiu o lodo de estação de tratamento como não plástico. Este fato pode estar relacionado com o elevado teor de matéria orgânica do resíduo ($45,08 \%$).

Para o lodo utilizado na presente pesquisa, a partir da curva granulométrica obtida, e dos índices de plasticidade, é possível classificar o material como sendo uma mistura mal graduada de partículas do tamanho de areia e silte, sendo classificado de acordo com classificação unificada de solos como corresponde um solo SM. Quanto à classificação Rodoviária dos solos (AASHTO), o mesmo pode ser classificado como A-2-4.

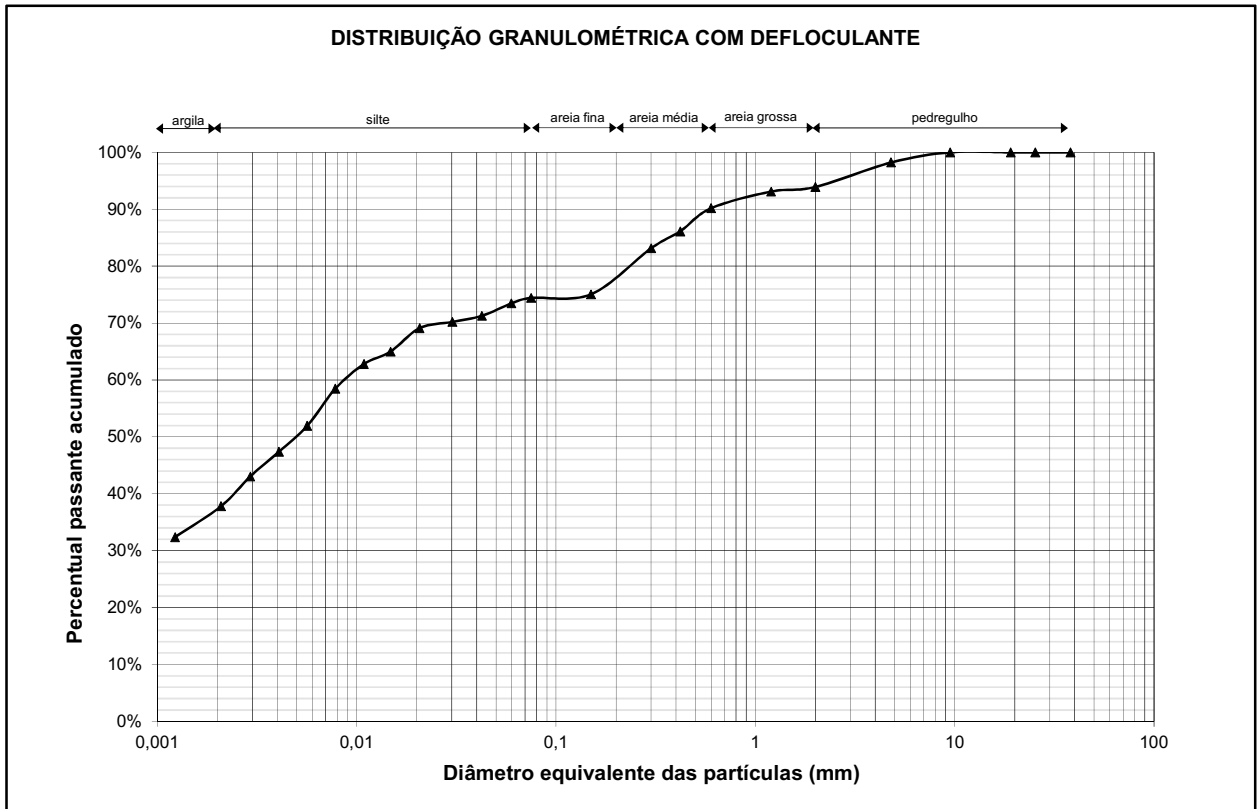
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

4.1.2 Caracterização física do solo

O solo residual de Joinville-SC utilizado no presente trabalho, apresentou a curva granulométrica conforme ilustra a Figura 40. Observa-se granulometria mais fina se comparada ao resíduo do lodo têxtil apresentado anteriormente. O solo é composto em sua maior parte por partículas de silte ($42,05\%$), seguido por partículas de argila ($32,38\%$). As partículas de areia compõem $25,57\%$ do material, e o restante, cerca de $6,09\%$ é formado por pedregulhos.

O resultado condiz com a análise tátil visual do material, que apontava um material de característica silto argilosa, além deste tipo de granulometria ser bastante comum entre os solos residuais da região de Joinville.

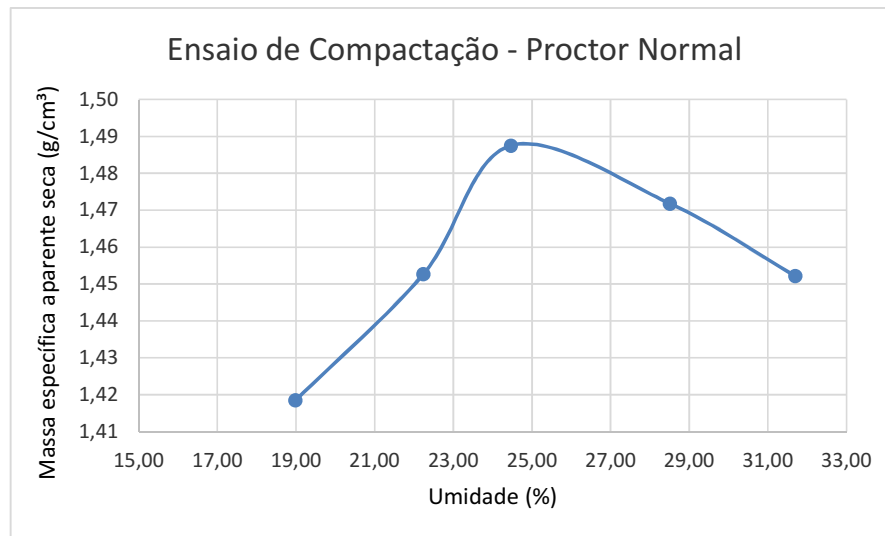
Figura 40 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: autor (2021).

Quanto aos valores referentes ao ensaio de compactação de Proctor Normal, o solo apresentou uma massa específica aparente seca máxima de aproximadamente $1,488\text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 25%, conforme curva de compactação apresentada na Figura 41.

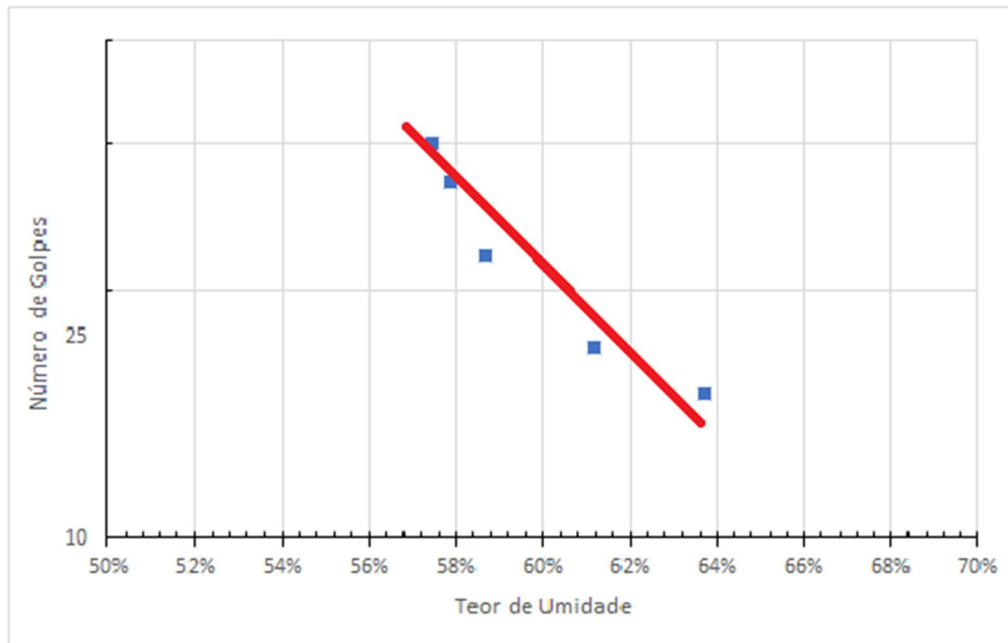
Figura 41 - Resultado do ensaio de compactação do solo.



Fonte: autor (2021).

Os resultados relacionados aos limites de Atterberg (LL e LP) são apresentados respectivamente na Figura 42 e no Quadro 5. É possível observar que para 25 golpes no aparelho de Casagrande, a umidade correspondente é de aproximadamente 61%, sendo este o limite de liquidez. Quanto ao limite de plasticidade, obteve-se o valor médio de 37% para o teor de umidade, resultando no índice de plasticidade (IP) de 24% dado pela diferença entre LL e LP. A massa específica real dos grãos obtida foi de 2,60 g/cm³, sendo estes resultados apresentados no Quadro 6. Assim como no presente estudo, Dirksen (2018) desenvolveu sua pesquisa com solos da região de Joinville e também obteve valores de massa específica real dos grãos próximos de 2,60 g/cm³ para algumas amostras, nas quais verificou-se a significativa presença do argilo-mineral caulinita.

Figura 42 - Ensaio do limite de liquidez para o solo.



Fonte: autor (2021).

Quadro 5 - Ensaio do limite de plasticidade para o solo.

Limite Plasticidade					
Ponto	1	2	3	4	5
# cap.	139	109	7	113	124
cap. (g)	8,11	8,26	8,24	8,62	8,84
cap. + m (g)	10,37	10,14	10,01	11,36	10,53
cap. + md (g)	9,75	9,64	9,53	10,62	10,08
m (g)	2,26	1,88	1,77	2,74	1,69
md (g)	1,64	1,38	1,29	2	1,24
W (%)	37,80%	36,23%	37,21%	37,00%	36,29%
Média Umidade (%)	36,91%				

Fonte: autor (2021).

Quadro 6 - Índices físicos do solo.

Massa específica real dos grãos	2,60 g/cm ³
LL	61%
LP	37%
IP	24%

Fonte: autor (2021).

A partir da curva granulométrica e dos índices físicos do solo, de acordo com a classificação unificada, o mesmo enquadra-se como CH – argila inorgânica de alta plasticidade, e quanto à classificação rodoviária, o solo classifica-se como A-7-5, ou solo silto-argiloso.

Um ponto importante a ser levantado a partir dos resultados de índices físicos obtidos para o solo, está relacionado ao elevado valor encontrado para o índice de plasticidade. Segundo Jenkins *apud* Morais (2015), solos com IP maiores do que 15% podem ser classificados como sendo altamente plásticos, possuindo também características de serem mais compressíveis se comparados a solos com menores índices de plasticidade. A partir do descrito por Morais (2015), é possível afirmar que o solo utilizado no presente trabalho possui elevada compressibilidade, sendo classificado como altamente plástico.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados médios obtidos para os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão simples com 3% de cimento, elaborados para esta pesquisa. Conforme detalhado no item 3, ressalta-se que foram elaborados nove corpos de prova para cada uma das dosagens definidas com 3% de cimento e porcentual de lodo variando entre 0% (C3L00), 5% (C3L05), 10% (C3L10) e 15% (C3L15), resultando em 36 corpos de prova com esse teor de cimento no total. A partir dos baixos valores de resistência encontrados para os corpos de prova com 15% de lodo têxtil, também foram elaborados mais 3 corpos de prova com 7% de cimento e 15% de lodo têxtil (C7L15), com o intuito de se verificar se a adição de teores mais significativos de cimento eram capazes de inibir a influência do lodo na redução da resistência da mistura, conforme será apresentado posteriormente.

Tabela 4 - Resumo dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples para corpos de prova com 3% de cimento.

nº	Ci (%)	Lodo (%)	Umidade (%)	γ_d (g/cm ³)	Cura (dias)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (kPa)	Tensão Média (kPa)
1	3	15	24,01	1,43	28	2050,78	142,40	69,44	49,12
2	3	15	24,01	1,44	28	2029,43	71,2	35,08	49,12
3	3	15	24,01	1,41	28	2077,62	89,00	42,84	49,12
4	3	15	25,41	1,41	14	2056,13	71,20	34,63	34,70
5	3	15	25,41	1,42	14	2042,76	71,20	34,85	34,70
6	3	15	25,41	1,41	14	2056,13	71,20	34,63	34,70
7	3	15	24,77	1,43	7	2032,09	0,00	0,00	0,00
8	3	15	24,77	1,44	7	2024,11	0,00	0,00	0,00
9	3	15	24,77	1,44	7	2021,45	0,00	0,00	0,00
10	3	10	25,78	1,43	28	2032,09	178,00	87,59	113,59
11	3	10	25,78	1,43	28	2032,09	249,20	122,63	113,59
12	3	10	25,78	1,42	28	2045,43	267,00	130,53	113,59
13	3	10	24,41	1,42	14	2048,37	142,40	69,52	78,12
14	3	10	24,41	1,42	14	2048,37	124,60	60,83	78,12
15	3	10	24,41	1,44	14	2053,46	213,60	104,02	78,12
16	3	10	24,56	1,44	7	2037,42	267,00	131,05	75,66
17	3	10	24,56	1,43	7	2050,78	106,80	52,08	75,66
18	3	10	24,56	1,45	7	2029,43	89,00	43,85	75,66
19	3	5	24,69	1,44	28	2045,43	284,80	139,24	133,59
20	3	5	24,69	1,46	28	2042,76	356,00	174,27	133,59
21	3	5	24,69	1,44	28	2040,09	178,00	87,25	133,59
22	3	5	24,62	1,46	14	2018,80	267,00	132,26	102,25
23	3	5	24,62	1,43	14	2037,42	178,00	87,37	102,25
24	3	5	24,62	1,44	14	2042,76	178,00	87,14	102,25
25	3	5	23,97	1,45	7	2034,76	213,60	104,98	92,97
26	3	5	23,97	1,46	7	2032,09	178,00	87,59	92,97
27	3	5	23,97	1,43	7	2061,50	178,00	86,35	92,97
28	3	0	24,24	1,42	28	2083,01	356,00	170,91	179,12
29	3	0	24,24	1,41	28	2099,22	391,60	186,55	179,12
30	3	0	24,24	1,41	28	2077,62	373,80	179,92	179,12
31	3	0	23,75	1,44	14	2083,01	302,60	145,27	156,45
32	3	0	23,75	1,44	14	2091,11	338,20	161,73	156,45
33	3	0	23,75	1,42	14	2083,01	338,20	162,36	156,45
34	3	0	23,75	1,43	7	2091,11	338,20	161,73	133,51
35	3	0	23,75	1,43	7	2091,11	249,20	119,17	133,51
36	3	0	23,75	1,43	7	2083,01	249,20	119,63	133,51

Fonte: autor (2021).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, observa-se de maneira geral que os corpos de prova apresentaram baixas resistências à compressão simples, principalmente nos corpos de prova com maiores teores de lodo incorporados. Os maiores valores médios de resistência foram obtidos nos corpos de prova de solo e cimento apenas, sem a presença de lodo

têxtil. Para esta composição, foram obtidos valores médios de 133,51 kPa, 156,45kPa e 179,12 kPa para os períodos de cura de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

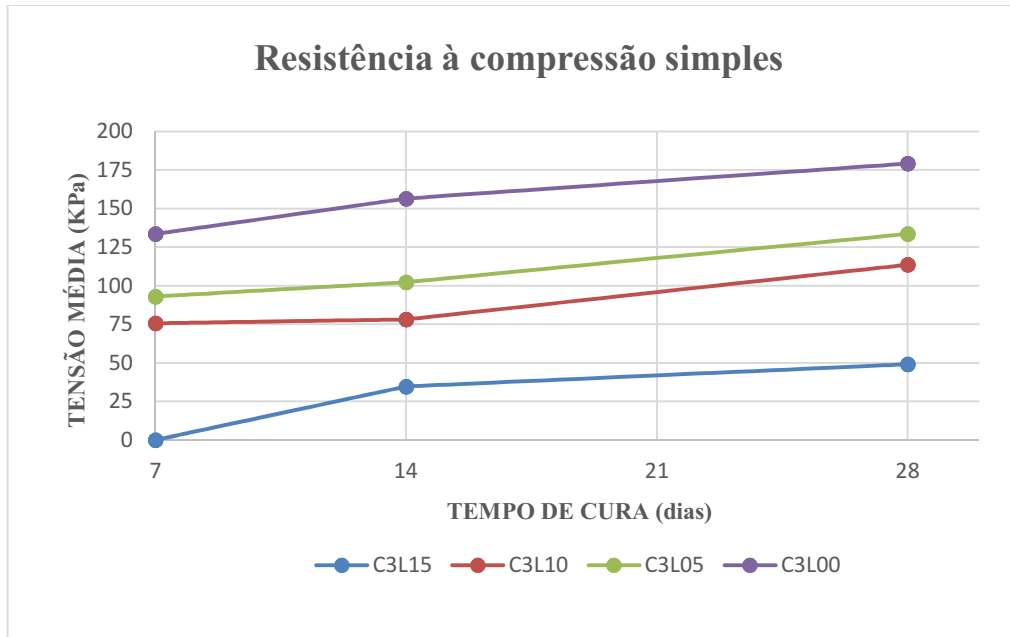
A medida que a proporção de lodo têxtil aumentou nas misturas realizadas, verifica-se significativa queda na resistência à compressão simples. Para os corpos de prova com 5% de lodo já é possível perceber perdas significativas de resistência, sendo que aos 28 dias de cura a resistência média apresentou valor de 133,59 kPa, ficando próximo do valor obtido para a mistura com 0% de lodo, porém aos 7 dias de cura. Se comparada com o valor máximo de resistência à compressão simples obtida pela mistura sem lodo, aos 28 dias, a mistura com 5% de lodo apresentou uma diminuição de cerca de 25,42% da resistência final.

Quanto aos corpos de prova com incorporação de 10% de lodo têxtil, os valores de resistência à compressão simples obtidos foram ainda menores, conforme o esperado. Aos 7 dias, os valores médios são de 75,66 kPa, enquanto que aos 28 dias de cura são de 113,59 kPa, aproximadamente 36,58% menores do que os valores obtidos para a mistura sem lodo para o mesmo período de cura.

Para os corpos de prova com 15% de lodo têxtil na sua composição, foram obtidos os menores valores para resistência à compressão simples. Durante a saturação em água dos corpos de prova com 15% de lodo, após mais de 12 horas em imersão, os mesmos não apresentaram estabilidade, não sendo possível a medição de resistência. Desse modo, verifica-se que para um teor de cimento de 3% e valores acima de 15% de lodo têxtil, os corpos de prova tornam-se muito instáveis e com resistências baixíssimas, configurando uma mistura não adequada em se tratando de suas propriedades mecânicas. Para estes corpos de prova, aos 14 e 28 dias foi possível realizar a medição da resistência à compressão simples após imersão em água, resultando nos valores resistência de 34,70 kPa e 49,12 kPa, respectivamente. Observa-se, portanto, uma redução na resistência de aproximadamente 72,58% se comparada à média obtida para os corpos de prova de solo e cimento aos 28 dias. Neste caso, verifica-se que a adição de 15% de lodo em misturas tratadas com 3% de cimento praticamente anula a ação do agente cimentante.

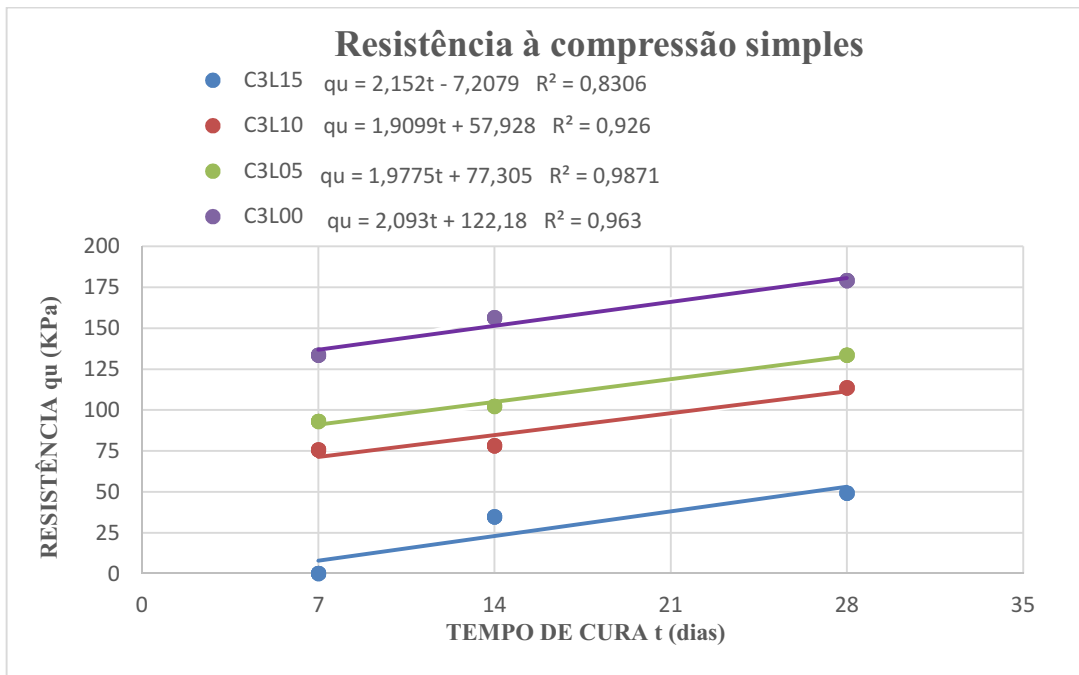
Com o objetivo de ilustrar os valores de resistência obtidos para cada dosagem, em função do tempo de cura do cimento, apresenta-se a Figura 43. Para melhor visualização, define-se o código das dosagens do gráfico no formato: CXLY, onde X e Y correspondem ao teor de cimento e de lodo têxtil na mistura, respectivamente. Na Figura 43 e 44, são apresentados os ajustes lineares dos resultados obtidos, bem como equações das resistências em função do tempo de cura do cimento.

Figura 43 - Variação da resistência à compressão simples para cada dosagem das misturas.



Fonte: autor (2021).

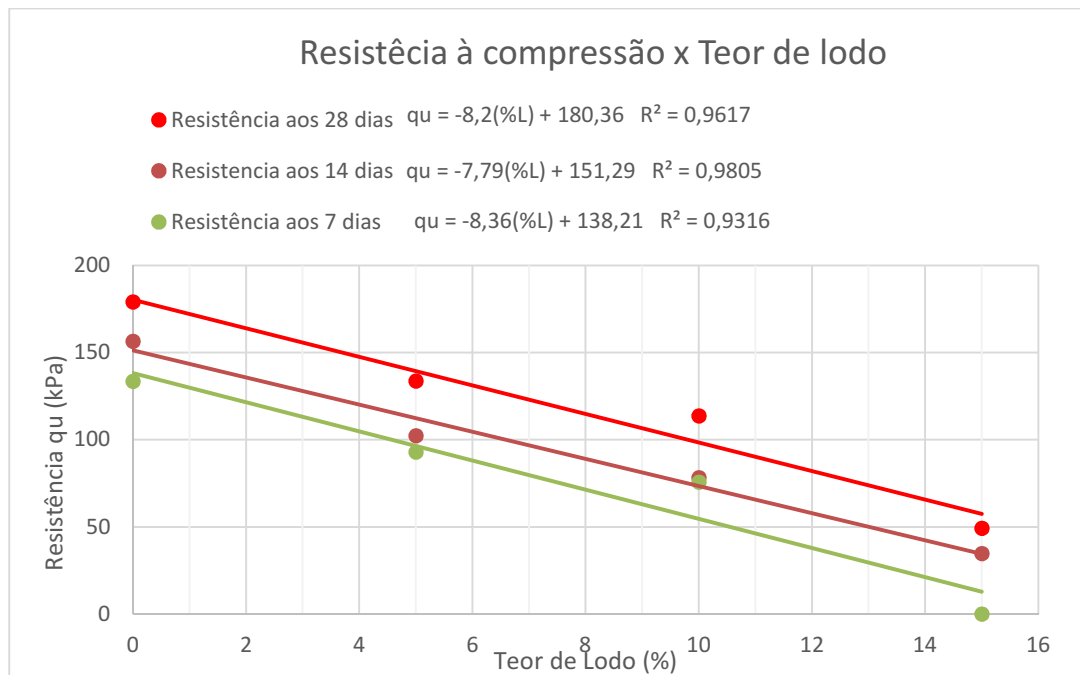
Figura 44 - Ajuste linear da resistência (qu) à compressão em função do tempo (t) de cura.



Fonte: autor (2021).

Similar ao realizado no gráfico apresentado na Figura 44, apresenta-se a Figura 45, com a variação da resistência à compressão simples em função das porcentagens de lodo na mistura.

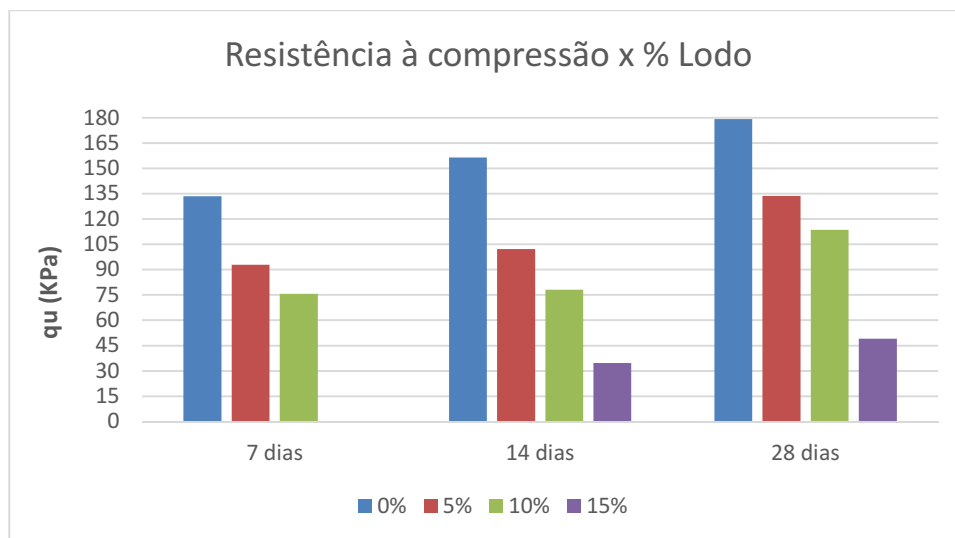
Figura 45 - Relação da resistência à compressão em função do teor de lodo.



Fonte: autor (2021).

Após análise da Figura 46 apresentada a seguir, é possível visualizar o decréscimo na resistência provocado pela presença de maiores porcentagens de lodo na mistura.

Figura 46 - Decréscimo na resistência à compressão em função do aumento do teor de lodo.



Fonte: autor (2021).

Conforme descrito no item 3, a partir dos baixos valores de resistência encontrados para os corpos de prova com 15% de lodo em sua composição, optou-se por realizar um experimento incorporando teor de cimento de 7% nessa mistura, com o objetivo de se avaliar a influência da adição de um teor maior de cimento em misturas com grandes porcentagens de lodo, a fim de se verificar se maiores teores de cimento são capazes de inibir a perda de resistência provocada pelo lodo. A partir disso foram moldados três corpos de prova com 7% de cimento e 15% de lodo, cada um rompido após 7, 14 e 28 dias de cura do cimento.

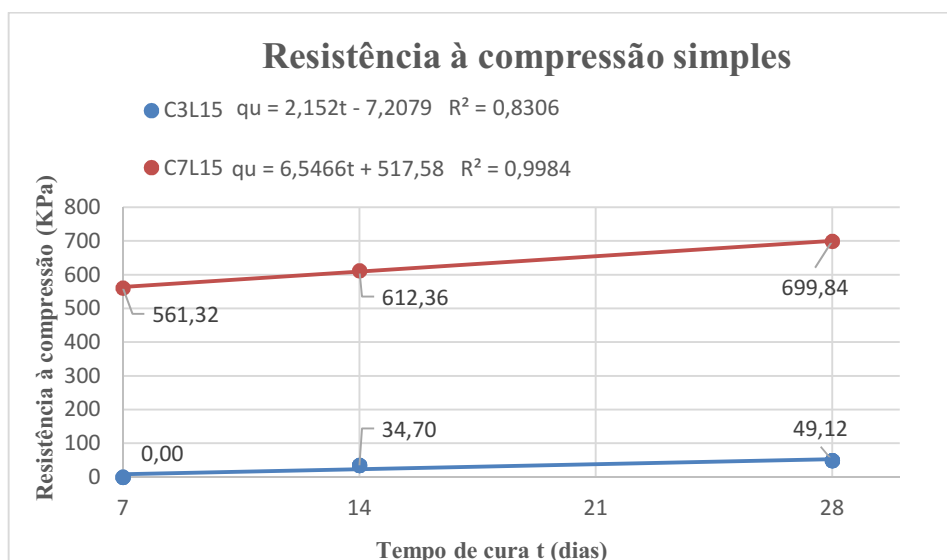
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5 e Figura 47. Observa-se grande ganho de resistência dos corpos de prova com a adição de 7% cimento, sendo que após os 28 dias de cura a resistência à compressão simples obtida é de 699,84 kPa, cerca de 1425% maior do que os 49,12 kPa obtidos nos corpos de prova com 3% de cimento, para a mesma quantidade de lodo.

Tabela 5 - Resultados de resistência à compressão simples para corpos de prova com 7% de cimento.

nº	Ci (%)	Lodo (%)	Umidade (%)	γ_d (g/cm ³)	Cura (dias)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão (kPa)
37	7	15	24,74	1,42	7	2061,23	1157,00	561,32
38	7	15	24,74	1,44	14	2034,76	1246	612,36
39	7	15	24,74	1,44	28	2034,76	1424,00	699,84

Fonte: autor (2021).

Figura 47 - Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento para amostras com 15% de lodo.



Fonte: autor (2021).

De modo geral, observa-se o aumento da resistência a compressão simples com o prolongamento do tempo de cura, devido a ocorrência das reações pozolânicas do cimento que proporcionam ganho de resistência. Desse modo, os maiores valores de cada dosagem ocorreram sempre após 28 dias de cura.

Quanto à interferência da adição de lodo têxtil na dosagem de solo e cimento, observa-se significativa perda de resistência à compressão simples à medida que maiores porcentagens de lodo são adicionadas. Assim, para as misturas com 3% de cimento, a dosagem que apresentou resistência mais elevada foi justamente a que não possuía o resíduo de lodo em sua composição, como já esperado. Conforme discutido por outros autores, solos e outros materiais com presença significativa de matéria orgânica (mais de 45% no caso do lodo têxtil), influenciam nas reações do cimento, fazendo com que o mesmo não desenvolva o máximo de sua resistência. Segundo Pessoa (2004), solos com presença de matéria orgânica, mesmo em baixas porcentagens, tendem a reagir com o CaO do cimento, o que resultará em maiores quantidades de cimento para se ter resultados idênticos aos obtidos em solos sem presença de matéria orgânica.

Diante disso, justifica-se o fato de os corpos de prova com 15% de lodo apresentarem resistência à compressão simples muito inferiores se comparados aos demais, não sendo possível inclusive realizar o ensaio para os corpos de prova com cura de 7 dias após imersão em água. Para esta mesma porcentagem de lodo têxtil, no entanto, verificou-se corpos de prova com resistência significativamente mais alta, 699,84 kPa aos 28 dias de cura, quando adicionado 7% de cimento na mistura. Desse modo, é possível afirmar que soluções envolvendo o emprego de lodo de estação de tratamento de efluentes em solos tratados com cimento tendem a exigir altos teores de cimento para adequado desempenho mecânico.

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

A seguir serão apresentados os resultados referentes ao ensaio de cisalhamento direto, obtidos a partir dos procedimentos apresentados no item 3.4. Com o objetivo de se ter conhecimento dos parâmetros relacionados à umidade e massa específica aparente seca das amostras, apresenta-se a Tabela 6, que contém o resumo dos dados dos corpos de prova submetidos aos ensaios.

Tabela 6 - Resumo dos dados das amostras do ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

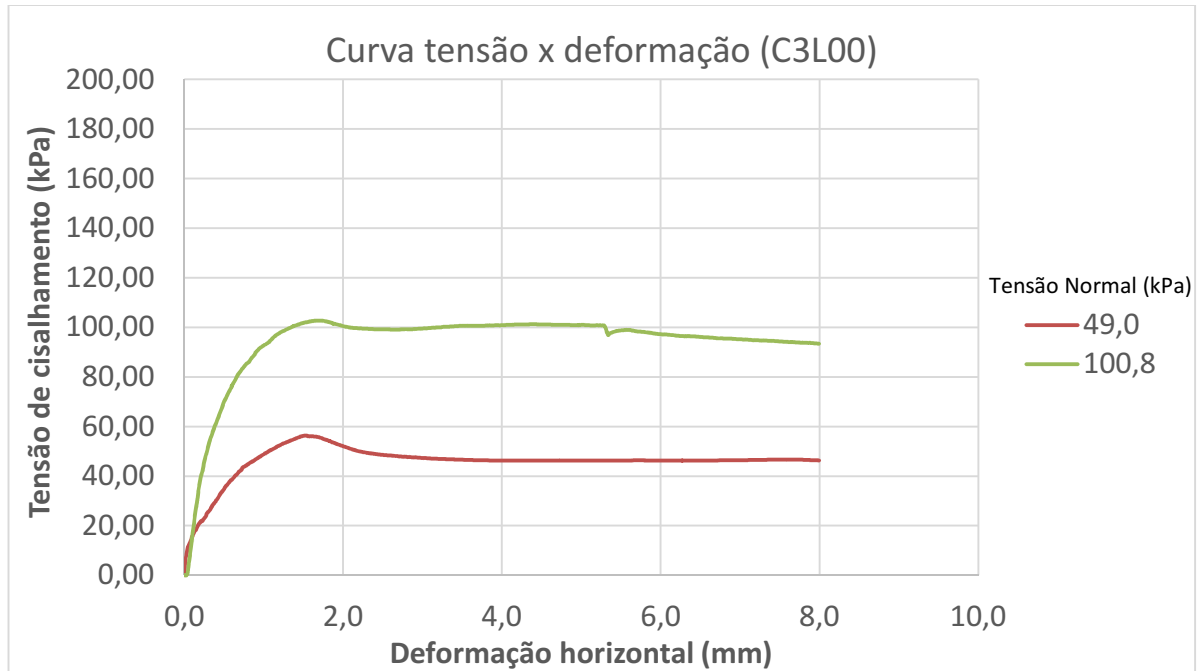
nº	Ci (%)	Lodo (%)	Peso (g)	Umidade (%)	γ_d (g/cm ³)	Cura (dias)	Tensão normal (kPa)
1	3	0	125,67	25,11	1,40	14	50
2	3		124,78	25,11	1,39	14	100
3	3		124,44	25,11	1,38	14	200
4	3	5	122,97	23,93	1,38	14	50
5	3		125,58	23,93	1,41	14	100
6	3		126,58	23,93	1,42	14	200
7	3	10	129,68	24,00	1,45	14	50
8	3		128,76	24,00	1,44	14	100
9	3		125,97	24,00	1,41	14	200

Fonte: autor (2021).

Na Figura 48 é apresentada a curva tensão-deformação da mistura de solo cimento, sem adição de lodo, para as tensões normais aproximadas de 50 e 100 kPa. Optou-se por desconsiderar a curva obtida para a tensão normal de 200 kPa, pois a mesma não apresentou resultados satisfatórios, com um traçado muito próximo da curva de 100kPa, influenciado possivelmente por perturbações do corpo de prova durante o processo de moldagem. Sendo assim, optou-se por desconsiderar estes resultados, para que não afetassem o traçado da envoltória de resistência. Em análise aos dados da Tabela 6, verifica-se que a amostra utilizada no ensaio de 200 kPa apresenta massa específica menor se comparada às demais, podendo ter ocorrido perda de material ou pequenas rupturas pontuais nas extremidades do corpo de prova que possam ter afetado o desenvolvimento da curva de tensão-deformação.

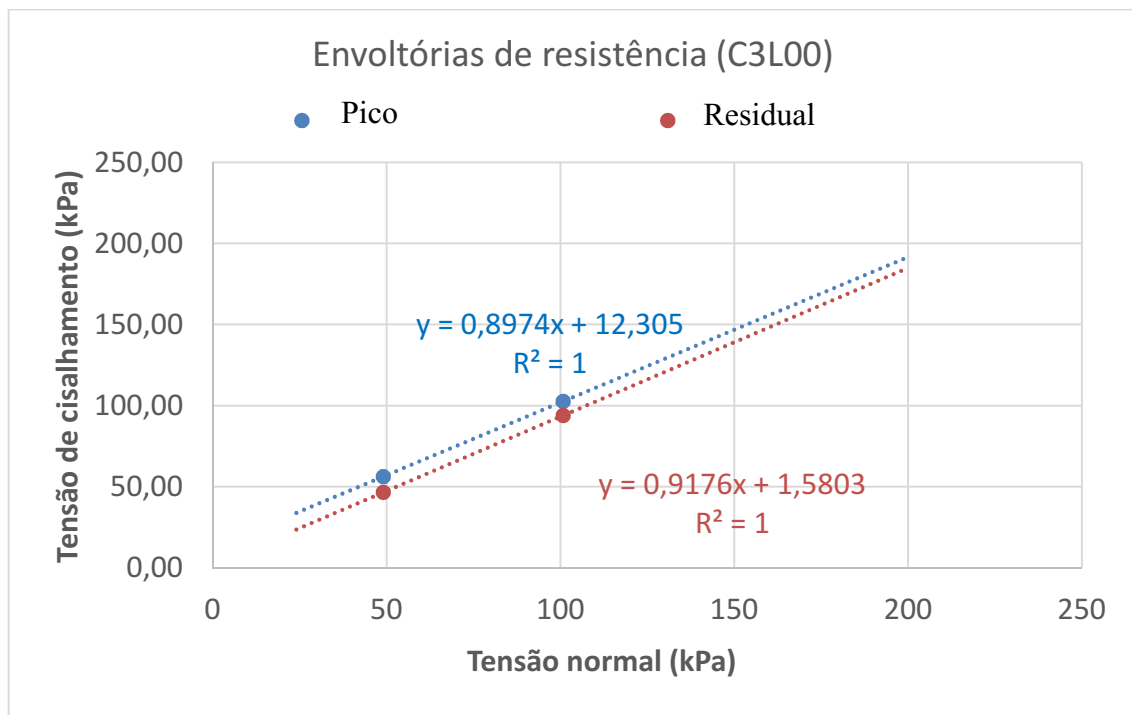
Assim, o resultado da envoltória de resistência para o solo tratado com cimento, sem adição de lodo, foi obtido utilizando apenas os pontos referentes às tensões normais de 50 e 100 kPa, sendo esta apresentada na Figura 49. Reconhece-se a deficiência na interpretação da envoltória gerada por apenas dois pontos e tem-se consciência de que para uma interpretação mais assertiva, o ensaio referente à tensão de 200 kPa deveria ser refeito, não havendo tempo hábil e material disponível para esta execução na presente campanha experimental. A Figura 49 demonstra também as equações das linhas de tendência do comportamento desse material (resistência de pico e pós pico), resultando em um ângulo de atrito de aproximadamente 41,90° e coesão de 12,30 kPa para a envoltória de pico da mistura composta apenas por solo e cimento.

Figura 48 - Curva tensão-deformação para amostras sem adição de lodo.



Fonte: autor (2021).

Figura 49 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 0% de lodo.

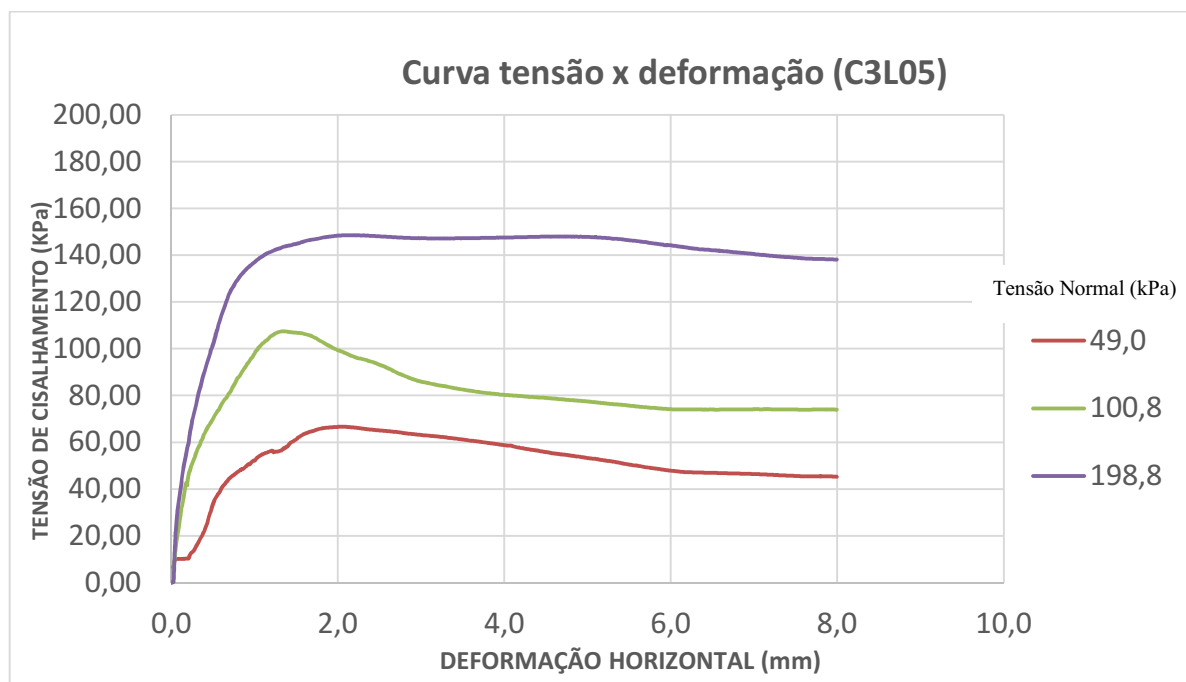


Fonte: autor (2021).

As Figuras 50 e 51 demonstram respectivamente a curva tensão-deformação e a envoltória de resistência obtida para as amostras com adição de 5% de lodo têxtil e 3% de

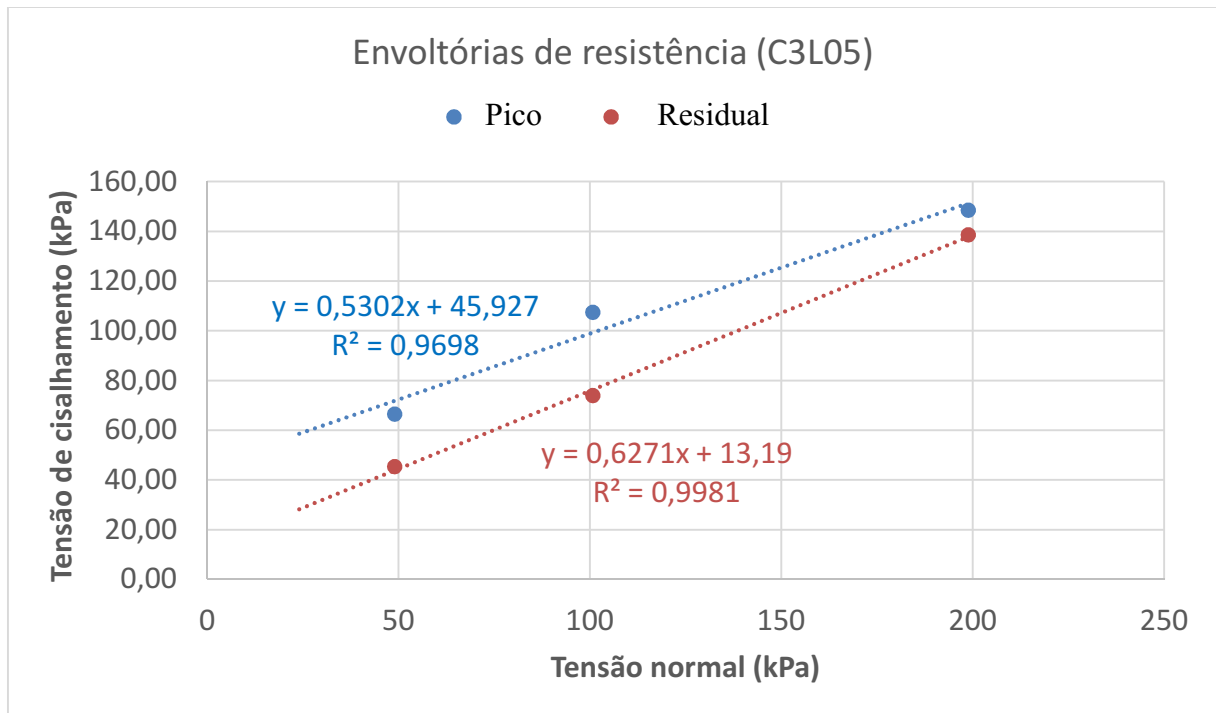
cimento. Assim como nos resultados apresentados para amostras sem lodo, observa-se a formação de um leve pico de resistência para valores mais baixos de tensões normais. Isso se deve ao fato da composição das misturas apresentar uma leve adição de cimento, que para níveis mais baixos de tensões promove um comportamento mais frágil do material. Os resultados de resistência ao cisalhamento direto para as amostras com 5% de lodo indicam valores de pico de cerca de 45,93 kPa para coesão e valores de pós pico de 13,19 kPa. Quanto ao ângulo de atrito, os valores obtidos variam de 27,93° para a envoltória de pico e 32,09° para a envoltória obtida com os valores de pós pico, o que não tem sentido. Acredita-se que os valores de pico desta mistura também tenham sofrido algum tipo de influência da perturbação da estrutura dos corpos de prova, fato que levou a um ajuste da linha de tendência que resultou a um ângulo de atrito inferior ao ângulo de pós pico. Neste sentido, entende-se que o valor do ângulo de atrito de pico desta mistura deva ser ao menos da ordem de 32 graus, como observado para o ângulo de pós pico e, por consequência o valor da coesão deve assumir um valor inferior ao identificado na envoltória, mais próximo ao valor de 13,19 kPa, observado para a condição residual.

Figura 50 - Curva tensão-deformação para amostras com 5% de lodo.



Fonte: autor (2021).

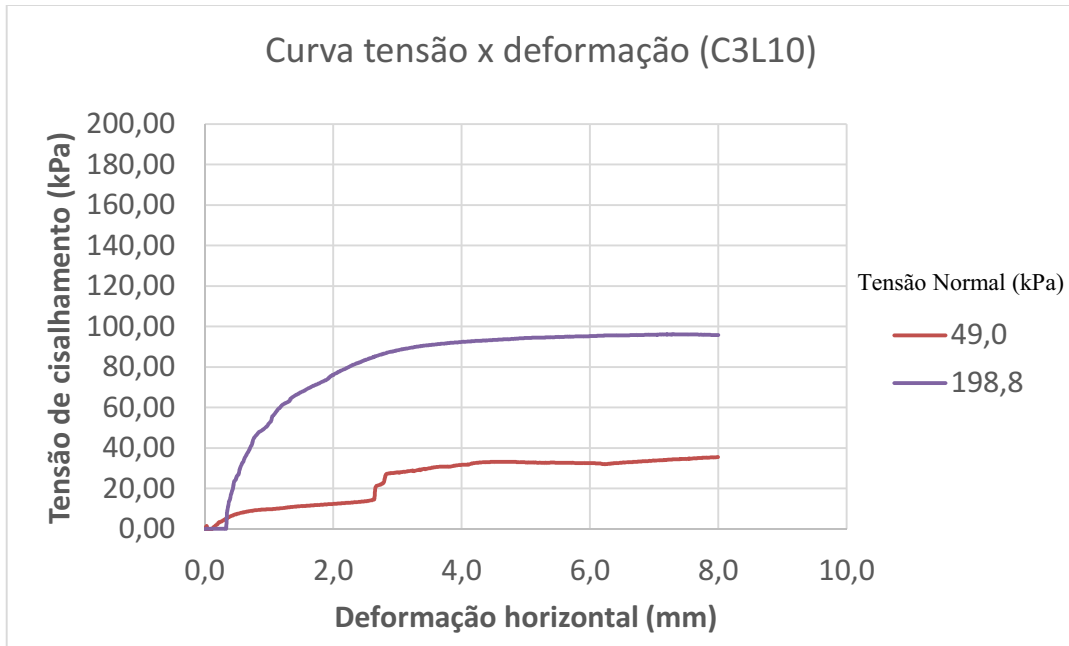
Figura 51 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 5% de lodo.



Fonte: autor (2021).

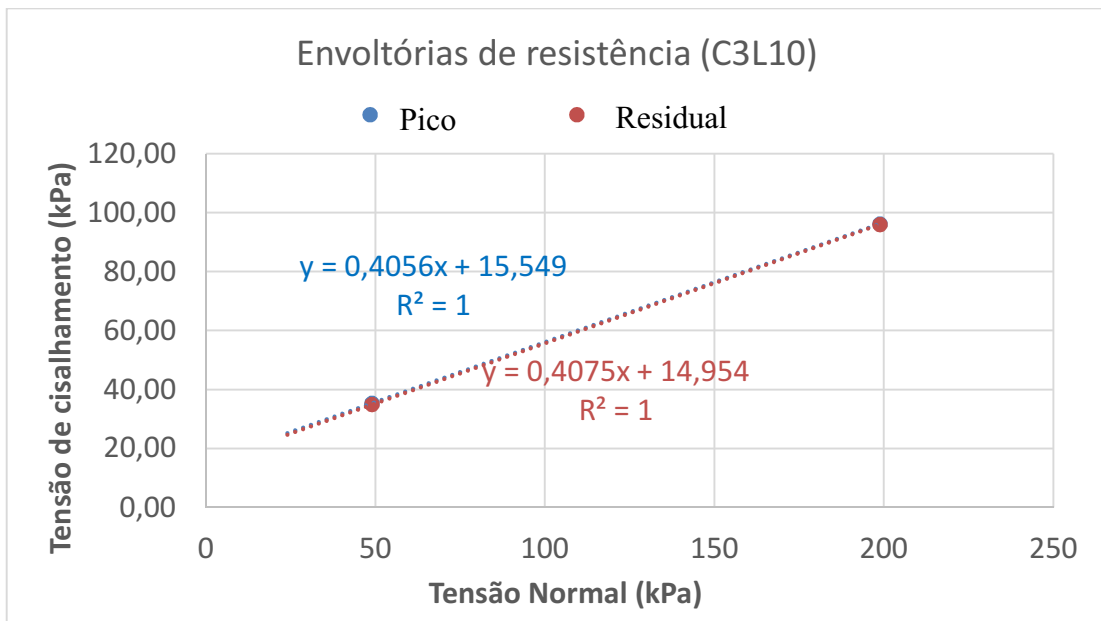
Quanto às amostras que levam em sua composição a porcentagem de 10% de lodo, os valores para a curva tensão-deformação e envoltória de resistência são apresentados nas Figuras 52 e 53, respectivamente. Similar ao ocorrido para a curva de solo-cimento, para a composição de solo, cimento e 10% de lodo foram obtidos valores insatisfatórios para a curva tensão-deformação referente à tensão normal de 200 kPa, possivelmente provenientes de perturbações durante o processo de moldagem do corpo de prova. Ao se observar os dados da Tabela 6, verifica-se que a massa específica deste corpo de prova foi menor se comparada aos outros dois corpos de prova, ensaiados com tensões normais de 50 kPa e 100 kPa. A partir disso, optou-se por desconsiderar estes resultados para o traçado das envoltórias de resistência, resultando nos valores de ângulo de atrito de $22,08^\circ$ e coesão de 15,55 kPa para a envoltória de pico. Reconhece-se novamente a deficiência na interpretação da envoltória gerada por apenas dois pontos e tem-se consciência de que para uma interpretação mais assertiva, o ensaio referente à tensão de 200 kPa deveria ser refeito, não havendo tempo hábil e material disponível para esta execução na presente campanha experimental.

Figura 52 - Curva tensão-deformação para amostras com 10% de lodo.



Fonte: autor (2021).

Figura 53 - Envoltória de resistência para corpos de prova com 10% de lodo.



Fonte: autor (2021).

Com o objetivo de se avaliar a influência de diferentes porcentagens de lodo têxtil empregados nas amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, apresenta-se a Tabela 7, com o resumo dos resultados apresentados anteriormente. Para fins de comparação entre os resultados, serão adotadas as resistências pico.

Tabela 7 - Resumo dos resultados do ensaio de cisalhamento direto.

nº	Cimento (%)	Lodo (%)	Ângulo de atrito (Φ')	Coesão (c')
1	3	0	41,90°	12,31 kPa
2	3	5	32,09°	13,19 kPa
3	3	10	22,17°	15,55 kPa

Fonte: autor (2021).

A partir do resumo dos resultados apresentados, verifica-se que os mesmos foram intensamente influenciados pelas eventuais perturbações nos corpos de prova durante o processo de moldagem. A deficiência nos resultados de tensão-deformação para as composições com 0% e 10% podem ter contribuído para a obtenção de resultados não coerentes com comportamentos já reportados pela literatura, sendo que observa-se significativa queda do ângulo de atrito das amostras à medida que as proporções de lodo têxtil incorporados aumentam. Após consulta em outras pesquisas que executaram o ensaio de cisalhamento direto, para solos ou composições com lodo têxtil, verificam-se pequenas variações de valores de ângulo de atrito, de ordem bem menores do que os encontrados no presente trabalho e incrementos consideráveis nos valores da coesão, os quais foram bastante sutis com base nos resultados da presente pesquisa.

De modo geral, observaram-se grandes variações de ângulo de atrito das amostras e resultados de coesão muito abaixo do provável para misturas com cimento incorporado. Não foram obtidos resultados compatíveis com outros trabalhos consultados na literatura, como por exemplo, o trabalho desenvolvido por Montalvan (2003) que verificou redução de coesão com a adição de lodo de ETA nas misturas, e pequeno aumento do ângulo de atrito, algo em torno de 3° de variação, muito menores do que as variações obtidas para este parâmetro no presente trabalho. Salienta-se que os resultados obtidos neste trabalho podem ter sido fortemente afetados pelas dificuldades encontradas durante a moldagem dos corpos de prova para o ensaio.

É importante salientar, que durante a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, foram encontradas inúmeras dificuldades, desde a garantia de homogeneidade da mistura após a compactação no cilindro pequeno, mas principalmente na moldagem dos corpos de prova com o auxílio do anel para o ensaio de cisalhamento direto. Após 14 dias de cura do cimento na mistura, a moldagem foi dificultada, fato que pode ter afetado a estrutura da mistura ensaiada.

A execução de ensaios de cisalhamento em misturas de lodo com baixos teores de cimento demonstrou que há necessidade de investigação de procedimentos alternativos para

moldagem e cura dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, de modo que a estrutura dos mesmos seja preservada durante todo o processo. Uma alternativa, seria a moldagem das amostras a partir do cilindro pequeno do ensaio de Proctor logo após a compactação da mistura, respeitando o período de cura com as amostras já moldadas e prontas para o ensaio, evitando posteriores alterações na configuração original dos corpos de prova, entretanto, possíveis perturbações poderiam continuar ocorrendo no momento da inserção do corpo de prova na caixa de cisalhamento. Outra metodologia que poderia contribuir com valores mais homogêneos dos ensaios de cisalhamento, seria a compactação utilizando o cilindro de Proctor em uma prensa hidráulica, similar ao que foi realizado no ensaio de resistência à compressão simples, com o objetivo de padronizar o peso das camadas e a energia de compactação, proporcionando maior homogeneidade às misturas.

4.5 PREMISSAS DE APLICAÇÕES DAS MISTURAS ESTUDADAS

Ao final do programa experimental apresentado, é possível levantar algumas considerações e premissas relacionadas ao possível emprego de misturas de solo-cimento com inserção de lodo de estação de tratamento de efluentes em aplicações de engenharia.

A partir dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão simples, verifica-se que a inserção de lodo nas amostras prejudica o desenvolvimento das reações do cimento provocando significativa perda de resistência, à medida em que maiores frações de lodo são empregadas nas misturas. Diante disso, define-se a premissa de que para o emprego desse tipo de material em composições de solo-cimento empregadas em camadas estruturais de pavimentos, como sub-base, por exemplo, deve-se avaliar se o decréscimo na resistência à compressão simples provocado pela presença de lodo ultrapassa os limites mínimos de resistência de 1,2 MPa exigidos para estes materiais. Em outras palavras, mesmo para uma composição de solo-cimento que atende ao limite mínimo estabelecido por normas de pavimentação com certa margem de folga, pode, ao ser adicionado porcentagens de lodo em sua composição, deixar de atender aos critérios exigidos.

Assim, para o possível emprego do lodo têxtil em misturas utilizadas como camadas estruturais de pavimentos, deve-se realizar ensaios específicos para cada mistura a fim de se avaliar o teor máximo de lodo que pode ser inserido sem que ocorram perdas significativas de resistência, que comprometam o desempenho estrutural da composição. Além disso, verificou-

se que a adição do lodo exigirá a adoção de maiores teores de cimento para a estabilização das misturas.

Em relação aos resultados do ensaio de cisalhamento direto, embora tenham sido afetados pelo processo de moldagem dos corpos de prova cimentados, foi possível identificar tendências de comportamento das misturas estudadas, que demonstraram um leve incremento na coesão e redução significativa do ângulo de atrito das composições com adição de lodo têxtil. Este fato exigiria a adoção de taludes bastante suaves, ou seja, com inclinações pouco acentuadas, com o propósito de se garantir a estabilidade geotécnica.

Para o emprego da mistura estudada em aterros com maiores inclinações, seria necessário realizar estudos empregando maiores porcentagens de cimento, com o objetivo de inibir as perdas de resistência causadas pela presença do lodo nas misturas, o que aumentaria a coesão.

5. CONCLUSÃO

Esse capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões pertinentes aos resultados obtidos dos ensaios realizados na pesquisa, tendo como base os objetivos gerais e específicos apresentados.

A partir dos resultados apresentados no ensaio de resistência à compressão simples, verifica-se que à medida que se adicionou maiores porcentagens de lodo têxtil, as resistências diminuíram drasticamente, sendo que, para porcentagens maiores do que 15% de lodo, o material tende a se tornar instável do ponto de vista das suas propriedades físicas, para uma composição com o solo residual empregado e 3% de cimento.

Os resultados de resistência à compressão simples obtidos para os corpos de prova com 15% de lodo têxtil e 7% de cimento foram significativamente maiores se comparados aos que levaram 3% de cimento em sua composição, com um aumento de resistência aos 28 dias de cerca de 1425%. Assim conclui-se que misturas de solo-cimento com o emprego de lodo de estação de tratamento de efluentes têxteis exigem maiores teores de cimento para o desenvolvimento adequado das reações químicas que proporcionam resistência.

Quanto ao ensaio de resistência ao cisalhamento direto, foram obtidos resultados que não condizem com o esperado para as misturas estudadas. A dificuldade na moldagem dos corpos de prova possivelmente tenha afetado a estrutura dos mesmos, o que certamente contribuiu com a obtenção de resultados divergentes de outras pesquisas similares encontradas na literatura. Assim, identifica-se como necessária a investigação de outros métodos de compactação e moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, a fim de se obter melhor padronização das amostras submetidas ao ensaio, evitando a obtenção de curvas tensão-deformação influenciadas por modificações estruturais das misturas.

Quanto ao possível emprego de lodo de estação de tratamento de efluentes em aplicações de engenharia, deve-se atentar ao fato de que a inserção desse tipo de material em composições que se mostrem adequadas para camadas estruturais em pavimentos, por exemplo, podem acarretar em perda de resistência considerável da mistura, tornando-a inutilizável tecnicamente para este fim. O ensaio de cisalhamento direto mostra que a utilização das misturas estudadas neste trabalho em composições de aterros, resultariam em inclinações bastante suaves para os taludes, a fim de se garantir estabilidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade ao estudo desenvolvido nesse trabalho, são sugeridos os seguintes temas:

- Realizar ensaios com outro tipo de solo empregado nas misturas e solos granulares;
- Realizar ensaios com maiores porcentagens de cimento, com o objetivo de se alcançar a resistência mínima exigida para camadas estruturais de pavimentos, ou outras aplicações;
- Realizar ensaios com outro tipo de estabilizador, como a cal;
- Verificar a influência da sucção nas misturas mediante realização de ensaios inundados e não inundados;
- Realizar ensaio de cisalhamento direto adotando outros métodos de moldagem dos corpos de prova, variando também a porcentagem de agente cimentante.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de usos consultivos de água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/estudo-da-ana-aponta-perspectiva-de-aumento-do-uso-de-agua-no-brasil-ate-2030>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS **Água na indústria: usos e coeficientes técnicos**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/aceso-tematico/usos-da-agua/aguanaindustria_usoecoefficientestecnicos.pdf. Acesso em: 22 nov. 2020.
- ALMEIDA, P. H. S. **Processo de solidificação/estabilização de lodo têxtil em matriz de argila: influência do tipo de argila**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2009.
- ARAUJO, R.N. A; LUCENA, F.B; FERREIRA, H.C. (1983) **Propriedades de resistência ao cisalhamento de solos lateríticos estabilizados com emulsão asfáltica catiônica RM-1C**. Anais da 18ª Reunião Anual de Pavimentação. Porto Alegre, RS.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9800 – Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12254 – Solo-cimento – Execução de base de solo cimento - Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- AZEVEDO, B. S.; CASTELLI, F.; CASIRAGHI, Y.; **Análise da resistência à compressão simples de material fresado com adição de cimento Portland**. XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí/RS, 2017.
- BITTENCOURT, S. et al. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) em solo degradado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, p. 315-324, Curitiba, 2012.
- CAPUTO, H. P., **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro, 1988.
- CASTRO, T. M., **Solidificação/estabilização de lodo gerado no tratamento de efluente de lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante**. 2010. 94f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Maringá, 2010.
- CAVALCANTI, J. E. W de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. Ed. Engenho Editora Técnica. São Paulo, p. 454, 2009.

- CENTRO EXPERIMENTAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Lodos ativados**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://www.saneamento.poli.ufrj.br/index.php/br/infraestrutura/lodos-ativados>. Acesso em: 23 nov. 2020.
- CHAGAS, M. A. **Tratamento de efluente têxtil por processos físico-químico e biológico**. 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 430**, 13 de maio de 2011. Condições e padrões do lançamento de efluentes. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 23 nov. 2020.
- COGO, M. C. **Estudo de caracterização e disposição dos resíduos de uma indústria têxtil do Estado do Rio Grande do Sul**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland**. 2014. Dissertação de Mestrado em Mecânica das Estruturas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade de Minho, Braga - Portugal, 2011.
- DALMEIDA, M. L. O. e VILHENA, A. (Coord.). **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado** – 2ª ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.
- DAS, B. M., **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7 ed. Estados Unidos, Cengage Learning, 2006.
- DIRKSEN, S. S. **Caracterização e classificação de solos da Bacia do Rio Pirai nas adjacências da área de implantação do Campus da UFSC Joinville**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- DOS SANTOS, A. B.; SANTAELLA, S. T. Remoção de DQO de água residuária de indústria têxtil empregando o processo de lodos ativados em batelada. **Revista Sanitária e Ambiental** v. 7, n. 3/4, jul./dez. 2002.
- ENAMORADO, M. A. **Estudo Comparativo Entre o Método Mecânico e o Método Físico-químico para Dosagem do Solo-cimento**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRJ. Rio de Janeiro. 1990.
- FELLENBERG, G.; **Introdução aos problemas da poluição ambiental**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 1980.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA-FIESC, **Boletim Setor Econômico-Estatístico**, Santa Catarina, 1996; pag. 07 – 20.
- FERNANDES, M. M., **Mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

FLACH, M. K., **Análise da estabilidade de um talude em solo natural com avaliação dos parâmetros de resistência em diferentes profundidades.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Geologia. Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. Rio de Janeiro, 2004, **Revista ABES** v. 4, n. 76, p. 1-84.

GONDIM, L. M., **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2008.

GUEDES, B. F. R., **Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil.** 2012. Dissertação. - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

HACHICH, Waldemar et al. **Fundações: teoria e prática.** 2º edição, São Paulo: PiniABMS/ABEF, 1998.

HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. Tratamento do efluente de uma indústria têxtil. Processo físico-químico com ozônio e coagulação/floculação. **Revista Saneamento Ambiental**, Florianópolis, v. 7, n. 1, p. 30-36, jan/mar., 2002.

HERBERT, C. A.; **Análise Laboratorial de lodos desidratados de estações de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** 2019. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

HEREK, L.; et AL. Incorporation of the textile sludge in a solid matrix sludge/clay. In: Enpromer- 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4 th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, 2005.

INGLES, O.G. & METCALF, J.B. (1972) **Soil Stabilization Principles and Practice.** Butterworths, Sydney, Australia, 374p.

INGUZA, M. P. D. et al. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgoto com vistas ao reuso na indústria cerâmica.** Montevideu, Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

KELM, T. A. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação.** 2014. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, jan./fev., 2002.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Mecânica de Suelos.** – México: Editorial Limusa S.A., 1974

LEÃO, M. M. D. et al. Controle ambiental na indústria têxtil: acabamento de malhas. Editora SEGRAC, Belo Horizonte, 2002, p. 356. Belo Horizonte, 2002.

LUCENA, L. C. F. L. **Estudo de aplicação de misturas solo lodo em base e sub-base**

de pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife –PE, 2012.

MACEDO, M.M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2004.

MAFRA, V. **Modelagem do ensaio de cisalhamento direto em elementos finitos.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MARTINS, A. C. S.; **Avaliação de características de resistência à compressão e durabilidade de um rejeito de mineração de bauxita com inserção de agente cimentante.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005.

MOLTANVAN, E. L. T.; **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

MORAIS, E. R. **Avaliação de índices físicos, mecânicos e estruturais do solo, Aplicado a pavimentação.** VETOR - Revista De Ciências Exatas E Engenharias, 25(2), 41–55. Natal, Rio Grande do Norte, 2015.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. Sociedade & Natureza. Uberlândia, n. 20, p. 111-124, jun. 2008.

OLIVEIRA, Alice Gonzaga de. **Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014.

PESSOA, F. H. C. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário.** Distrito Federal, 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade de Brasília, 2004.

PETRY, N. S. **Uso de resíduos de ágata como agregado em argamassa de cimento Portland branco.** 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

PINTO, C.de S. **Curso Básico de Mecânica de Solos.** 2ª Edição com exercícios resolvidos. São Paulo: Oficina de Textos. 2000.

PRIM. E.C.C.; **Relatório de visita técnica à indústrias têxteis de Blumenau.** Florianópolis - UFSC, 1996. (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

- PRIM, E. C. C.; **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário.** Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- RIBEIRO, S. P. T., **Terraplanagem: metodologias e técnicas de compactação.** Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade do Porto, Portugal, 2008.
- RIGO, M. M. et al. Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**, v. 8, n. 1, p. 174 – 186, 2014.
- RODRIGUES, M. F. **Avaliação da eficiência de coagulantes e floculantes na remoção de fósforo em efluentes de frigorífico de suínos.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.
- SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Manual técnico, p. 96, Curitiba, 1999.
- SANIN, L. B. B. A indústria têxtil e o meio ambiente. Tecnologia e meio ambiente. *In*: XIV CONGRESSO DA FLAQT, p. 13-34. Caracas, 1997.
- SANTOS, A. D.; **Estudo da possibilidade de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo.** 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
- SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** vol. 2. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001.
- TWARDOKUS, R. G. **Reuso de água no processo de tingimento na indústria têxtil.** 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977.
- VIECILI, C.; **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, 2003.
- WERK, S. M. S. **Estudo da Influência dos Métodos de compactação no comportamento resiliente de solos.** 2000. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.