



UPE - UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO - POLI
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA FERNANDA DE ALMEIDA PORTELA

AVALIAÇÃO DA DISPERSIVIDADE E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS DE UM SOLO DA FORMAÇÃO
BARREIRAS COM RCD E CAL

Recife, PE

2019



UPE - UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO - POLI
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA FERNANDA DE ALMEIDA PORTELA

AVALIAÇÃO DA DISPERSIVIDADE E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS DE UM SOLO DA FORMAÇÃO
BARREIRAS COM RCD E CAL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Co-orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife, PE

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

P843a Portela, Maria Fernanda de Almeida
Avaliação da dispersividade e resistência à compressão de compósitos de um solo da formação barreiras com RCD e cal./ Maria Fernanda de Almeida Portela. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2019.
144 f.: il.

Orientadora: Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafaytte
Co-orientador: Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Solo Dispersivo. 2. Resíduos de Construção e Demolição. 3. Cal. I. Engenharia Civil - Dissertação II. Lafaytte, Kalinny Patrícia Vaz (orient.). III. Ferreira, Silvio Romero de Melo (co-orient.). IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

CDD: 690.0286

MARIA FERNANDA DE ALMEIDA PORTELA

**AVALIAÇÃO DA DISPERSIVIDADE E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE COMPÓSITOS DE UM SOLO DA FORMAÇÃO
BARREIRAS COM RCD E CAL**

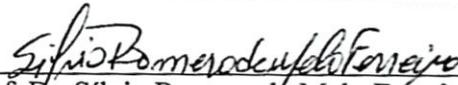
BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



Prof. Dr. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco

Co-orientador:

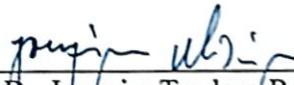


Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco

Examinadores:



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

Recife, PE

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, meu irmão e meu esposo, que sempre me transmitem seu amor incondicional e forças para continuar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder a dádiva da vida, a saúde, por mostrar que sempre há um propósito para a existência de cada pessoa que passa na minha vida e por sempre me dar forças para continuar e ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Fernando Portela e Maria de Jesus Portela, e ao meu irmão, Matheus Portela, por ser a minha base, pelo incessante apoio, amor e paciência, pelo constante esforço para me presentear com uma educação de qualidade, e por sempre acreditar em mim.

Ao meu esposo, Diego Siqueira, por todo amor, paciência, dedicação, proteção e por me apoiar em todos os momentos da minha vida, mesmo nos mais difíceis, para que eu alcance todos os meus sonhos, estando sempre ao meu lado.

A minha professora orientadora, Kalinny Lafayette, pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa, pelos ensinamentos, incentivo e confiança no meu trabalho.

Ao meu co-orientador, professor Silvio Romero, pelas suas contribuições e pela disposição em sempre melhorar o trabalho desenvolvido.

Aos meus amigos de mestrado, Elivelthon Nascimento, Amanda Almeida e Nilberte Muniz, pelo grande companheirismo, pelo apoio nos estudos das disciplinas e por todos os momentos de alegria e tristeza que compartilhamos nessa jornada.

A Elivelthon Nascimento, por realizar todos os ensaios comigo, por trabalhar incansavelmente para que nós dois tivéssemos um desenvolvimento impecável da pesquisa, sacrificando inclusive seus dias de descanso.

Agradeço aos amigos que a engenharia me deu, Elaine, Nathália e Yuri, pela amizade, parceria e por compreender a minha ausência em alguns momentos.

Ao técnico Fábio Ferreira, que sempre foi fundamental para que todos os ensaios fossem realizados, apesar de todas as dificuldades encontradas, fazendo muito mais que o exigido pela sua função.

Aos docentes e demais funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PEC, por todo conhecimento compartilhado.

Aos técnicos do laboratório de solos da Universidade Federal de Pernambuco, Gutemberg e Francisco, por todo o suporte e dedicação no apoio ao ensaio de Pinhole utilizado nesta pesquisa.

Ao laboratório de combustíveis da Universidade de Pernambuco, por permitir a realização do ensaio de pH.

Ao doutorando, Jonas Bezerra, por me ajudar na coleta de solo realizada em Itamaracá e pelo apoio.

À empresa Ciclo Ambiental por, gentilmente, fornecer o agregado reciclado utilizado nesta pesquisa e por disponibilizar todas as informações sempre que necessário.

À professora Lucia Valença, do departamento de Geologia da UFPE, pela dedicação e execução da análise de solo com lupa binocular, e à professora Carlinda, do departamento de Engenharia de Minas da UFPE, pela interpretação dos resultados de difratometria de raios-X.

Ao doutorando, Jonny Dantas, pelo auxílio na elaboração da análise de componentes principais e interpretação dos resultados.

À Imobiliária Antônio Batista, por permitir a realização da coleta de amostras no terreno de sua propriedade.

À CAPES, por financiar parte desta pesquisa através da concessão de uma bolsa.

A todos que de alguma forma contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada, e que tornaram mais leve a jornada ocorrida até a finalização deste trabalho.

RESUMO

Devido à necessidade de utilizar solos que possuem características indesejadas, em razão da disponibilidade de material no local da construção, a indústria da construção civil tem investido na busca por soluções que viabilizem a sua utilização, reduzindo os impactos gerados no meio ambiente. Por outro lado, a destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) ainda ocorre de forma precária, sendo este, ao longo dos anos, objeto de estudo de muitas pesquisas por ser um material passível de reutilização. Neste contexto, pode-se destacar o uso para estabilização de solos, podendo conferir melhorias relativas às propriedades mecânicas do solo. Os solos dispersivos apresentam problemas relacionados à erosão por origem química. Porém, havendo a necessidade de utilização, ele se mostra como uma alternativa para usos diversos, necessitando, contudo, de mecanismos de estabilização para sua aplicação. Assim, esta pesquisa utiliza um solo dispersivo, obtido em uma encosta da Ilha de Itamaracá, localizada no Estado de Pernambuco, para obtenção de compósitos que utilizam como estabilizantes o RCD e a cal hidratada, a fim de viabilizar sua aplicação. Dessa forma, o estudo busca aplicar os materiais para melhorar o caráter dispersivo do solo e sua resistência à compressão simples. Para tanto, utilizou-se compósitos (feitos com a fração de solo que fica retida na peneira nº 50 e a fração de RCD passante na mesma peneira), com percentuais de substituição de solo por RCD em 20%, 40% e 60%. Quanto a cal hidratada, adicionou-se em peso seco dos materiais os percentuais de 3%, 5% e 7%. Em relação à dispersividade, foram analisados ainda compósitos de solo e RCD, sem peneiramento, a fim de verificar as diferenças em relação às composições que passaram por peneiramento. Foram realizados ensaios físicos, químicos, mineralógicos e mecânicos. O *Crumb Test* demonstrou que o solo tem caráter dispersivo, resultado corroborado com a realização do *Pinhole Test* e dos ensaios químicos. A substituição de solo por RCD modificou os percentuais das frações granulométricas, entretanto, não alterou a sua classificação, que é de areia siltosa (SM). Contudo, ocorreu a modificação do caráter dispersivo dos materiais, conforme demonstrou o ensaio sedimentométrico comparativo e o *Pinhole Test*, nos compósitos peneirados, apresentando exceções para os compósitos que não passaram por peneiramento. Nos compósitos peneirados, com e sem cal se eliminou a dispersividade, sendo os compósitos de 40% e 60% de RCD aqueles com melhor comportamento. Quanto à densidade dos compósitos, os valores foram muito semelhantes ao do solo e do RCD. Em relação ao aspecto químico, o pH de estabilização reduziu com o acréscimo de RCD, sendo as amostras estabilizadas a partir da adição de 5% de cal. A adição de resíduos, bem como a de cal, alterou também a umidade ótima e a densidade seca máxima, sendo a primeira aumentada em até 36,79% à medida que se acrescenta RCD, enquanto que a segunda reduz cerca de 9,40%. Quanto à resistência à compressão simples (RCS), aos 120 dias o RCD apresentou 793 kPa, e o solo 765 kPa. Os valores de RCS obtidos demonstram que é viável substituir uma parcela do solo por RCD com dosagens de cal apenas para, 40% RCD e 7% de cal, de 1167 kPa de resistência, e 60% RCD com 5% e 7%, com 1080 kPa e 1315 kPa de RCS, respectivamente. Dessa forma, verifica-se nesses materiais que é possível solucionar o caráter negativo da dispersividade sem comprometer o comportamento mecânico do solo, contribuindo ainda para a destinação correta de resíduos, favorecendo a sustentabilidade.

Palavras-chave: Solo dispersivo. Resíduos de construção e demolição. Cal.

ABSTRACT

Due to the need to use soils that have undesirable characteristics, because to the availability of material at the construction site, the construction industry has invested in the search for solutions that enable its use, reducing the impacts generated in the environment. On the other hand, the disposal of construction and demolition wastes (CD&W) still occurs in a precarious way, which, over the years, has been the subject of many research studies because it is a reusable material. In this context, it is possible to emphasize the use for stabilization of soils, being able to give improvements regarding the mechanical properties of the soil. Dispersive soils present problems related to erosion by chemical origin. However, if it is necessary to use it, it proves to be an alternative for different uses, but it needs stabilization mechanisms for its application. Thus, this research uses a dispersive soil, obtained in a slope of the Island of Itamaracá, located in the State of Pernambuco, to obtain composites that use as stabilizers the CD&W and the hydrated lime, in order to enable its application. Thus, the study seeks to apply the materials to improve the dispersive character of the soil and its unconfined compressive strength. For this, composites (made with the fraction of soil that is retained in the number 50 sieve and the CD&W fraction passed through the same sieve) were used, with percentages of soil replacement by CD&W in 20%, 40% and 60%. As for hydrated lime, the percentages of 3%, 5% and 7% were added in the dry weight of the materials. In relation to the dispersivity, soil and CD&W composites were also analyzed, without sieving, in order to verify the differences in relation to the compositions that were sieved. Physical, chemical, mineralogical and mechanical tests were performed. The Crumb Test demonstrated that the soil is dispersive, a result corroborated with the performance of the Pinhole Test and the chemical tests. The soil substitution by CD&W modified the percentage of the granulometric fractions, however, did not change its classification, which is silt sand (SM). However, there was a change in the dispersive character of the materials, as demonstrated by the comparative sedimentometric test and the Pinhole Test, in the sieved composites, with exceptions for the composites that did not undergo sieving. In the sieved composites, with and without lime the dispersivity was eliminated, being the composites of 40% and 60% of RCD those with better behavior. As for the density of the composites, the values were very similar to the soil and RCD. Regarding the chemical aspect, the stabilization pH reduced with the addition of RCD, and the samples were stabilized from the addition of 5% lime. The addition of residues, as well as lime, also altered the optimum moisture and the maximum dry density, the first being increased by up to 36.79% as RCD is added, while the latter reduces by about 9.40%. As for the unconfined compressive strength (UCS), at 120 days the CD&W had 793 kPa, and the soil 765 kPa. The obtained UCS values show that it is feasible to substitute a portion of the soil by CD&W with lime dosages only for 40% CD&W and 7% lime, 1167 kPa resistance, and 60% CD&W with 5% and 7% with 1080 kPa and 1315 kPa of UCS, respectively. In this way, it is verified in these materials that it is possible to solve the negative character of the dispersivity without compromising the mechanical behavior of the soil, contributing also to the correct destination of residues, favoring sustainability.

Keywords: Dispersive soil. Construction and demolition waste. Lime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Pipings</i> presentes em uma voçoroca (Cachoeira do Campo, Ouro Preto/MG) (a); <i>sinkhole</i> desenvolvido após exploração de retirada de solo (b).....	25
Figura 2 - Processo erosivo em forma de ravina (Cabo de Santo Agostinho) (a); voçoroca do Buraco Fundo localizada na cidade de Santa Maria/RS (b)	26
Figura 3 - Composição gravimétrica média do RCD em Recife/PE	30
Figura 4 - Brita 19 (a) e brita 25 (b) recicladas (material misto)	32
Figura 5 - Tipos de composição granulométrica	38
Figura 6 - Resistência à compressão simples de solo dispersivo tratado com cal.....	41
Figura 7 - Localização da área de estudo da pesquisa.....	44
Figura 8 – Precipitações médias mensais dos anos compreendidos entre 2006 e 2017, no município da Ilha de Itamaracá (a); Precipitações mensais do ano de 2017, no município da Ilha de Itamaracá (b).....	47
Figura 9 - Mapa dos tipos de solo do município da Ilha de Itamaracá.....	49
Figura 10 - Mapa geológico da Ilha de Itamaracá	50
Figura 11 - Fluxograma das etapas do programa experimental	53
Figura 12 - Detalhe da encosta de estudo	54
Figura 13 - Cal hidratada CH-I utilizada na pesquisa	55
Figura 14 - Compósitos de solo com substituição de 20%, 40% e 60% de RCD	57
Figura 15 - Torrões retirados das amostras coletadas	59
Figura 16 - Execução de ensaio de massa específica	61
Figura 17 - Moldagem de corpo-de-prova para realização do ensaio do furo de agulha	62
Figura 18 - Equipamento utilizado em recipiente de vidro (a); compactação do solo com soquete padronizado (b); nivelamento da amostra (c).....	63
Figura 19 - Ábaco para avaliação da dispersividade baseado na química de água intersticial.....	64
Figura 20 - Amostras preparadas para ensaio de pH (a); aferição de pH da amostra (b).....	66
Figura 21 - Execução do ensaio de compactação	67
Figura 22 - Moldagem em prensa manual (a); Controle tecnológico do corpo-de-prova (b)	68
Figura 23 - Amostras compactadas e mantidas em câmara úmida.....	69
Figura 24 – Identificação dos perfis da encosta	72
Figura 25 - <i>Crumb test</i> da primeira camada do perfil 5	73
Figura 26 - Curva granulométrica do solo, RCD e compósitos	73

Figura 27 - Curvas granulométricas do solo com e sem defloculante, com e sem agitação mecânica.....	77
Figura 28 - Ensaio de Pinhole test: vazão x carga hidráulica (a); vazão x tempo (b)	79
Figura 29 - Coloração da água após a carga hidráulica de 50, 8 mm (a); diâmetro do furo antes do ensaio (b); diâmetro do furo após o ensaio (c); corte longitudinal do corpo-de-prova após o ensaio (d)	80
Figura 30 - Vazão x carga hidráulica dos compósitos peneirados (a) e sem peneiramento (b)	81
Figura 31 - Vazão x carga hidráulica das misturas solo-cal.....	82
Figura 32 - Vazão x carga hidráulica do compósito A adicionado de cal.....	83
Figura 33 - Vazão x carga hidráulica do compósito B adicionado de cal	84
Figura 34 - Vazão x carga hidráulica do compósito C adicionado de cal	84
Figura 35 - Relação entre o percentual de sódio e o total de sais dissolvidos do solo.....	89
Figura 36 - Valores de pH relacionados aos percentuais de cal aplicados no solo e compósitos	90
Figura 37 - Análise mineralógica do solo com presença de quartzo (a), ilmenita (b) e turmalina (c).....	91
Figura 38 - Difratoograma do solo	92
Figura 39 - Avaliação da composição do RCD com uso de lupa binocular.....	92
Figura 40 - Difratoograma do RCD.....	93
Figura 41 - Curvas de compactação do solo e do RCD.....	93
Figura 42 - Curvas de compactação dos compósitos peneirados	95
Figura 43 - Curvas de compactação das misturas solo-cal.....	96
Figura 44 - Curvas de compactação do compósito A adicionado de cal.....	97
Figura 45 - Curvas de compactação do compósito B adicionado de cal	98
Figura 46 - Curvas de compactação do compósito C adicionado de cal	98
Figura 47 - Plano de ruptura típico, a 60° (a); Microfissuras no corpo-de-prova solo + 3% cal (b); Plano vertical de ruptura (c).....	100
Figura 48 – Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 7 dias.....	101
Figura 49 - Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 28 dias.....	102
Figura 50 - Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 120 dias.....	102

Figura 51 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 7 dias	103
Figura 52 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 28 dias	104
Figura 53 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 120 dias	105
Figura 54 - <i>Screeplot</i> dos autovalores das componentes principais	110
Figura 55 – Escores individuais em função das componentes principais	111
Figura 56 - Relação das variáveis com as componentes	112
Figura 57 - Curvas granulométricas do RCD	131
Figura 58 - Curvas granulométricas do compósito A	131
Figura 59 - Curvas granulométricas do compósito B	131
Figura 60 - Curvas granulométricas do compósito C	132
Figura 61 - Curvas granulométricas do compósito D	132
Figura 62 - Curvas granulométricas do compósito E	132
Figura 63 - Curvas granulométricas do compósito F	133
Figura 64 - Curvas de resistência à compressão simples do RCD	135
Figura 65 - Curvas de resistência à compressão simples do solo	135
Figura 66 - Curvas de resistência à compressão simples de S3	135
Figura 67 - Curvas de resistência à compressão simples de S5	136
Figura 68 - Curvas de resistência à compressão simples de S7	136
Figura 69 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A	136
Figura 70 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A3	137
Figura 71 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A5	137
Figura 72 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A7	137
Figura 73 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B	138
Figura 74 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B3	138
Figura 75 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B5	138
Figura 76 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B7	139
Figura 77 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C	139
Figura 78 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C3	139
Figura 79 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C5	140
Figura 80 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C7	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da dispersividade de um solo pelo ensaio do <i>crumb test</i>	26
Tabela 2 - Normas referentes aos usos do RCD	31
Tabela 3 - Exigências físicas para as cales	35
Tabela 4 - Composição média das cales brasileiras.....	35
Tabela 5 - Aspectos físicos destacados no município da Ilha de Itamaracá e na localidade da encosta	46
Tabela 6 - Quantidade de ensaios realizados e materiais utilizados.....	52
Tabela 7 - Resultados das análises químicas e físicas na cal.....	56
Tabela 8 – Percentuais utilizados na preparação das amostras dos compósitos.....	57
Tabela 9 - Nomenclatura dos compósitos peneirados e solo, adicionados de cal hidratada ...	58
Tabela 10 - Número de camadas por perfil da encosta.....	59
Tabela 11 - Grau de dispersão pelo teste do densímetro duplo	60
Tabela 12 - Cálculo de parâmetros para avaliação da dispersividade de solos argilosos.....	64
Tabela 13 - Critérios de aceitação dos corpos-de-prova moldados	69
Tabela 14 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido	70
Tabela 15 – Granulometria das amostras de solo, RCD e compósitos.....	74
Tabela 16 - Valores de C_u , C_c e classificação SUCS e TRB do solo, RCD e compósitos	75
Tabela 17 - Percentuais de dispersão dos materiais estudados.....	77
Tabela 18 - Densidade real das amostras de solo, RCD e compósitos	78
Tabela 19 - Classificação quanto à dispersividade pelo ensaio de Pinhole Test.....	85
Tabela 20 – Variação de altura da amostra ao longo do tempo.....	86
Tabela 21 - Propriedades químicas do solo	87
Tabela 22 - Percentuais de óxidos presentes no solo e no RCD.....	88
Tabela 23 - Características químicas da água intersticial do solo	89
Tabela 24 - Valores de umidade ótima e densidade seca máxima do solo e do RCD.....	94
Tabela 25 - Valores de umidade ótima e densidade seca máxima dos compósitos.....	95
Tabela 26 - Umidades ótimas e densidades seca máximas do solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal	99
Tabela 27 - Valores de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade inicial das amostras ensaiadas aos 7, 28 e 120 dias de cura	108
Tabela 28 - Valores de ΔR dos corpos-de-prova ensaiados	109

Tabela 29 - Autovalores e variâncias relacionadas as variáveis de estudo.....	110
Tabela 30 - <i>Loadings</i> das variáveis em relação às componentes principais.....	112
Tabela 31 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 7 dias	142
Tabela 32 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 28 dias	143
Tabela 33 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 120 dias	144

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Considerações iniciais	18
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo geral	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Estrutura da dissertação	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 Solos dispersivos	23
2.1.1 Identificação dos solos dispersivos	24
2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD).....	28
2.2.1 Definição e classificação de RCD	28
2.2.2 Composição do RCD	29
2.2.3 Agregado reciclado.....	30
2.2.4 Uso do RCD como agregado e suas propriedades.....	32
2.3 Cal.....	34
2.4 Estabilização de solos.....	36
2.4.1 Estabilização granulométrica.....	37
2.4.2 Estabilização química	39
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.1 Localização da área	43
3.2 Aspectos gerais do município.....	44
3.3 Aspectos físicos	45
4 METODOLOGIA.....	51
4.1 Primeira etapa do programa experimental.....	54
4.1.1 Solo utilizado na pesquisa	54

4.1.2 RCD beneficiado	55
4.1.3 Cal utilizada nas misturas	55
4.1.4 Preparação das amostras	56
4.2 Segunda etapa do programa experimental.....	58
4.2.1 Caracterização física.....	58
4.2.1.1 Crumb test	58
4.2.1.2 Granulometria.....	60
4.2.1.2.1 Ensaio sedimentométrico comparativo (SCS).....	60
4.2.1.3 Densidade real e Limites de Atterberg	61
4.2.1.4 Pinhole Test	61
4.2.1.5 Ensaio de expansibilidade	62
4.2.2 Caracterização química.....	64
4.2.2.1 Ensaio de pH.....	65
4.2.3 Caracterização mineralógica.....	66
4.3 Terceira etapa do programa experimental	67
4.3.1 Caracterização mecânica	67
4.3.1.1 Compactação	67
4.3.1.2 Compressão simples	68
4.4. Quarta etapa do programa experimental.....	69
4.4.1 Análise estatística dos valores de RCS (Critério de Chauvenet).....	70
4.4.2 Análise de componentes principais	71
5 RESULTADOS.....	72
5.1. Crumb test	72
5.2 Granulometria.....	73
5.2.1 Ensaio sedimentométrico comparativo (SCS).....	76
5.3 Densidade real	78
5.4 Limites de Atterberg.....	79

5.5 Pinhole Test	79
5.6 Ensaio de expansibilidade	85
5.7 Composição química	87
5.8 Ensaio de pH.....	89
5.9 Ensaio mineralógicos	91
5.10 Compactação	93
5.11 Compressão simples	100
5.12 Análise estatística dos valores de RCS (Critério de Chauvenet).....	108
5.13 Análise de componentes principais	109
6 CONCLUSÕES	114
REFERÊNCIAS	117
APÊNDICE A – Ensaio sedimentométrico comparativo (curvas)	130
APÊNDICE B - Curvas de resistência à compressão simples	134
APÊNDICE C – Memória de cálculo de ΔR_0	141

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se uma descrição dos solos dispersivos e a necessidade de sua utilização, devido à quantidade disponível para aplicação geotécnica, junto à problemática de destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD). É apresentada também a aplicação dos RCD e da cal como materiais estabilizantes, além da justificativa do tema, dos objetivos geral e específicos, e a estruturação da dissertação, de acordo com os capítulos desenvolvidos.

1.1 Considerações iniciais

A revolução industrial, iniciada no século XVIII, é o ponto inicial para o fenômeno da industrialização dos bens e serviços, a qual tem se apresentado de forma crescente até os dias atuais. Esse avanço tecnológico foi acompanhado pelo aumento populacional levando à problemas relacionados à ocupação do espaço urbano, que, por sua vez, nem sempre apresenta as condições ideais de utilização para o fim ao qual se destina. Além disso, o crescimento afeta diretamente o consumo de matérias primas naturais, inclusive no que diz respeito à fabricação de materiais de construção

Em um panorama de longo prazo, pode-se inferir que a utilização exacerbada de matéria prima está reduzindo gradativamente a disponibilidade de materiais, podendo levar a escassez. De acordo com Rocha *et al.* (2016), o setor da construção civil representa um dos maiores consumidores de matéria-prima da natureza, representando de 20% a 50% do total de recursos consumidos pela sociedade.

Em razão do caráter consuntivo do setor construtivo, a disponibilidade de áreas para execução de obras de ocupação do solo gradativamente está sendo reduzida, estando em geral, mais disponíveis, aquelas cujo solo necessita de prévio tratamento para implantação. O solo de assentamento de uma estrutura constitui elemento importante na definição do comportamento solo-estrutura, e por isso, muitas vezes é necessária a utilização de técnicas para torná-lo adequado ao uso.

Devido à necessidade de utilizar esses solos, seja como material de construção ou como base de implantação de estruturas, estão sendo desenvolvidas técnicas para permitir o seu uso com

comportamento aceitável para as cargas de aplicação. Como exemplo, pode-se destacar a estabilização, também chamada de melhoramento de solos.

A estabilização de solos pode ser definida como os procedimentos que visam a melhoria e estabilização das seguintes propriedades: resistência, deformabilidade e permeabilidade. Assim, confere-se maior resistência a cargas, por meio da correção da granulometria, da plasticidade, ou por meio da adição de materiais ou substâncias que proporcionem maior coesão, proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos do solo (BORDIGNON *et al.*, 2016).

Enquadrado no contexto de incompatibilidade com o comportamento desejado de um solo, podem-se destacar os solos dispersivos. Segundo Samaniego (2015) a dispersividade em um solo está ligada à defloculação espontânea de suas partículas quando em presença de água, sendo solos extremamente erosivos, sendo os problemas mais graves encontrados em obras hídricas como as de canais e barragens. Para este tipo de material, pode-se destacar a utilização de agregados e de cal a fim de conferir estabilização mecânica e química, respectivamente.

De forma paralela à necessidade de utilização de materiais que estabilizem o comportamento dispersivo do solo, busca-se encontrar uma forma de aplicar os resíduos da construção e demolição (RCD) para um determinado fim, pois, segundo Righi *et al.* (2016), é estimado que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados são advindos de atividades construtivas. Paschoalin Filho, Dias e Cortes (2014) afirmam que os resíduos de construção civil (RCC) têm sido objeto de pesquisa, para que seja possível, além de reduzir a sua geração, tornar viável a sua reutilização, reciclagem e manejo.

Assim, aliando-se a necessidade por buscar alternativas que consomem menos recursos naturais, com a possível utilização de resíduos da construção civil, e a redução do número de áreas que possuem solos de boa qualidade, demonstra-se a necessidade de pesquisas que objetivem utilizar da melhor forma possível os materiais citados.

1.2 Justificativa

De acordo com Goulart *et al.* (2016) a estabilização do solo o torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, sob aplicação de cargas, em relação ao original, seja por processo natural

ou artificial. Essa técnica pode ser feita por adição química, chamada de estabilização química, ou por meio de correção granulométrica, denominada de estabilização mecânica/granulométrica. No âmbito dos solos dispersivos, a estabilização exerce papel fundamental no aprimoramento das suas propriedades, proporcionando significativas mudanças no que concerne ao seu caráter erosivo, o qual é responsável por comprometer a sua aplicação em diferentes tipos de obra geotécnica.

A técnica a ser empregada em solos dispersivos deve ser escolhida com cautela, pois este tipo de solo, que apresenta características de erodibilidade devido à sua composição química, pode não reagir da forma esperada com o estabilizante adotado, provocando efeito reverso, e levando a problemas estruturais que o utilizem como material base para uma determinada estrutura, devido à defloculação espontânea das suas partículas em presença de água.

A escolha da técnica a ser utilizada depende de vários fatores, procurando-se otimizar o compromisso técnico-econômico face aos requisitos do projeto e à natureza dos solos envolvidos. Em paralelo a este aspecto, considera-se ainda o fator ambiental, o qual representa atualmente um ponto decisivo nessa escolha.

Para Lima (2016), o expressivo percentual de volume de RCD pode causar danos ambientais, devendo-se verificar políticas de reaproveitamento. Nesse viés, como na maioria das cidades brasileiras não há áreas para disposição final de RCD, ele entra como alternativa viável, através da utilização como agregado reciclado, para estabilização mecânica do solo por meio da correção de granulometria.

A estabilização do solo com o RCD leva em consideração o diâmetro das partículas que o constituem. O RCD é composto por diversos materiais de construção, como cimento, concreto, dentre outros, os quais podem proporcionar melhorias quando aplicados a um outro solo. Assim, é possível aplicar a fração do RCD correspondente à de argila do solo, para que se retire a porção referente à dispersividade, reduzindo assim a característica do solo que leva a erosão quando em presença de água.

Por outro lado, a utilização dos materiais existentes no local da obra tem se tornado um dos requisitos para escolha da técnica de estabilização, levando em alguns casos à utilização da estabilização química, com o uso da cal ou do cimento, por exemplo (SAMANIEGO, 2015). A

aplicação desses materiais pode ser feita em diferentes proporções, a depender do solo utilizado e da oferta de materiais. Nos solos dispersivos, a cal entra em contato com a argila e pode modificar a sua capacidade de defloculação em água por meio das reações de troca catiônica, flocculação, reação pozolânica e carbonatação, agindo ao longo do tempo na sua estabilização.

Inúmeras pesquisas a respeito de solos tratados com cal têm sido realizadas, tendo apresentado ganhos significativos de capacidade de suporte e redução de recalques, sendo o seu comportamento mecânico influenciado, dentre outros fatores, pela quantidade de cal adicionada e pelo teor de umidade (VILLALBA, 2015).

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de estudar o comportamento do solo dispersivo com adição de resíduos de construção e demolição (RCD) e cal, de modo que seja possível viabilizar a sua estabilização, possibilitando dessa forma a sua utilização na construção civil.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento da dispersividade e resistência à compressão simples de compósitos de solo com adição de RCD e cal hidratada.

1.3.2 Objetivos específicos

Com o intuito de atender ao objetivo geral proposto, foram destacados os seguintes objetivos específicos:

- analisar as propriedades físicas e mecânicas do solo, dos agregados reciclados de RCD, e dos compósitos obtidos com esses materiais e cal;
- avaliar o comportamento químico do solo;
- avaliar a mineralogia do solo e dos agregados reciclados de RCD;

- identificar o percentual de cal mais adequado para estabilização química dos compósitos;
- verificar a influência da substituição de teores diferentes de fração de solo por RCD, e da adição de cal, no comportamento dispersivo dos materiais;
- verificar a influência da substituição de teores diferentes de fração de solo por RCD, e da adição de cal, na resistência à compressão simples dos materiais analisados.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta pesquisa está estruturada em seis capítulos, sendo o primeiro deles referente à introdução, cujo conteúdo destaca o contexto no qual a pesquisa está inserida, a importância do seu estudo, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 é formado pela revisão da literatura a respeito dos solos dispersivos, do RCD, da cal e da estabilização de solos, com intuito de fornecer embasamento para a temática estudada.

O terceiro capítulo, intitulado por caracterização da área de estudo, destaca as particularidades do município de origem do solo, em relação aos aspectos gerais e físicos da região, além de fornecer informações a respeito da localização do solo e sua respectiva encosta de extração.

A metodologia está inserida no quarto capítulo do trabalho. Nele são evidenciadas todas as etapas do programa experimental utilizado, como a escolha e coleta de materiais e os diferentes ensaios executados no desenvolvimento da pesquisa.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados e demonstra as respectivas análises. O último capítulo, de número 6, contém as conclusões referentes ao trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Aborda-se neste capítulo os assuntos relacionados à estabilização de solos, desde o seu conceito até os diferentes tipos de aplicação nos solos dispersivos. Para estes, aborda-se a definição e as formas de identificação em campo. São demonstrados ainda os temas relacionados aos materiais estabilizantes dos solos, como o RCD e a cal, para os quais se apresentam os conceitos e usos.

2.1 Solos dispersivos

Em projetos de engenharia geotécnica podem ser encontrados solos que não apresentam boas características, ou seja, que não são desejáveis para utilização em obras. Segundo Turkoz *et al.* (2014) estes solos podem ser, dispersivos, expansivos, muito compressíveis ou muito permeáveis. Os autores afirmam ainda que os solos dispersivos são considerados problemáticos, podendo essa característica causar danos a muitas estruturas de engenharia.

Problemas associados aos solos dispersivos têm sido encontrados em várias partes do mundo: Austrália, EUA, Argentina, Brasil, Grécia, Índia, África do Sul e Tailândia; como é descrito por Goodarzi e Salimi, (2015), Lafayette *et al.* (2011), Ferreira (1999), Sherard, Dunningan e Decker (1976), e Aitchison, Ingles e Wood. (1963).

O fenômeno da dispersão dos solos/argilas começou a ser constatado a partir de pesquisas desenvolvidas na Austrália por meio do estudo de rupturas de barragens causadas por erosão no ano de 1960. Vakili *et al.* (2017), afirmam que a existência de solos de argila dispersiva em projetos de construção tem levado a acidentes em todo o mundo afetando barragens, aterros, canais de irrigação, estradas, infraestruturas de municípios e outras áreas geotécnicas.

Solos dispersivos são aqueles deslocados facilmente e de forma rápida em água corrente, sendo a tendência de ocorrência tanto maior quanto mais partículas ficarem suspensas em um fluxo de água (HADDAD; JAVDANIAN; EBRHIMPOUOR, 2017). Essa tendência de dispersão ou defloculação é correlacionada por Umesha, Dinesh e Sivapullaiah (2009) ao tipo de argila presente e a química do solo.

O papel da característica dispersiva na degradação de um solo tem se apresentado como ponto importante na investigação de um solo devido à crescente necessidade de utilizar esse tipo de material. Rengasamy, Tavakkoli e Mcdonald (2016) afirmam que os solos dispersivos apresentam propriedades físicas relativamente ruins, como a facilidade de sofrer erosão, as

quais afetam negativamente o comportamento geotécnico de um solo para uso em fundações e outras infraestruturas.

Para viabilizar a utilização desses solos, têm sido feitas pesquisas para que, com adição de materiais, se promova a estabilização do seu comportamento dispersivo. Ao avaliar a durabilidade de um solo dispersivo estabilizado com cal, Villalba (2015) expõe em função de problemas apresentados em obras geotécnicas, que as argilas tendem a apresentar alta susceptibilidade à dispersão e a defloculação em presença de água, provocando o fenômeno do *piping* através de um maciço de solo induzido por mecanismos de erosão interna.

Rajesh e Marimuthu (2015) também destacam que os solos dispersivos são suscetíveis à erosão quando em presença de água, explicando que neste solo, a partícula de argila em contato com a água se comporta como única, pois possui menor atração eletroquímica, não se aderindo às demais. Esse fenômeno gera uma força repulsiva que rompe as ligações químicas de van der Waals das partículas, sendo estas carregadas, levando à erosão interna do solo.

Segundo aqueles autores, a dispersividade do solo se deve principalmente à presença de íons de sódio na estrutura do solo que sejam suscetíveis à substituição por íons de cálcio e alumínio e não devido à presença de sódio na água dos poros. A dispersividade de algumas argilas é associada por Turkoz *et al.* (2014) à sua estrutura química, mineralogia, presença de vazios no solo e a natureza e teor de sais dissolvidos na água que percola o solo, sendo estruturalmente instáveis podendo se desintegrar facilmente.

Cruz (2008) fez mesma afirmação, complementando que os argilo-minerais constituintes do solo possuidores de alta capacidade de troca catiônica tendem a apresentar maior potencial de dispersibilidade. Associa também que a susceptibilidade à dispersão está relacionada também à quantidade de sódio no solo e à de cátions (sódio, potássio, cálcio e magnésio) dissolvidos na água intersticial.

2.1.1 Identificação dos solos dispersivos

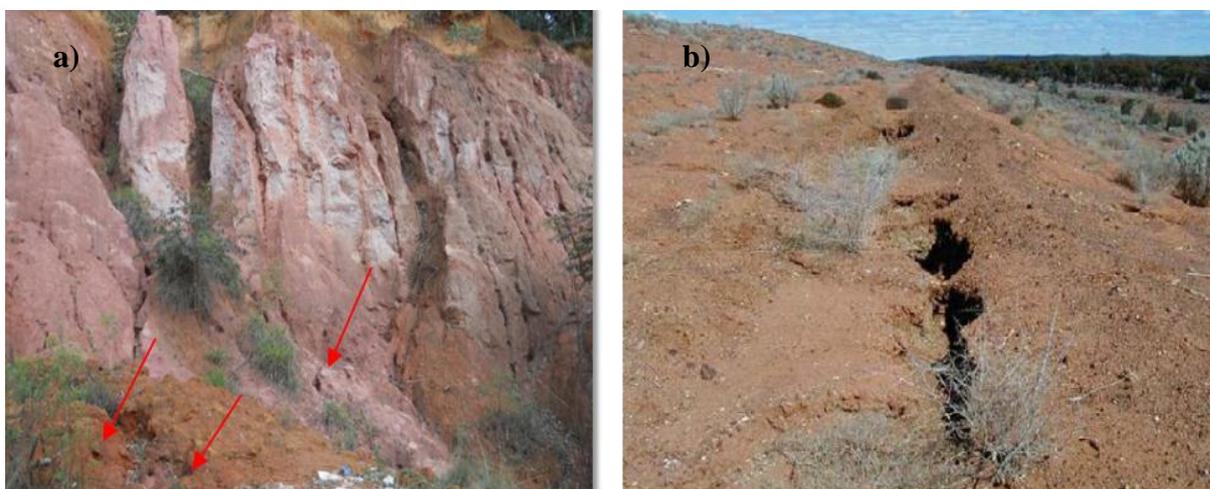
Quando em presença de água, alguns solos coesivos apresentam características erosivas, as quais acarretam, por vezes, um processo de perda das partículas do solo. Essa perda, na qual as partículas passam a estar presentes em suspensão na água que as carregou é o chamado processo de dispersão.

Tendo em vista tal fato, Samaniego (2015) sugere que a identificação de solos dispersivos deve ser iniciada pelo reconhecimento do solo nas características originárias, ou seja, em campo, para verificar se há indicativos de erosão.

Cruz (2008) aponta que existem feições características que apresentam comportamentos erosivos, superficiais ou subterrâneos, podendo em função da sua natureza promover a existência de *pipings* (erosões em túnel) (Figura 1 a), *sinkholes* (formação de depressões ou ralos) (Figura 1 b), ravinas (Figura 2 a) ou voçorocas (Figura 2 b). Contudo, a ausência de erodibilidade não garante que o solo é não-dispersivo. Dessa forma, é preciso que sejam feitos ensaios para determinação em laboratório através das características do solo e da investigação da sua composição.

Samaniego (2015), bem como Villalba (2015) e Rajesh e Marimuthu (2015), afirma que as argilas dispersivas não podem ser diferenciadas das argilas não-dispersivas por ensaios convencionais a exemplo da granulometria, limites de consistência e compactação. Sendo assim, para identificar um solo como sendo dispersivo é preciso que sejam realizados ensaios específicos que têm o objetivo de dar parâmetros para constatar a dispersividade do solo. Já o ensaio do densímetro duplo, também chamado de sedimentométrico comparativo é considerado relevante para Umesh, Dinesh e Sivapullaiah (2011) no qual, considera-se a dispersão percentual de acordo com o tamanho das partículas.

Figura 1 - *Pipings* presentes em uma voçoroca (Cachoeira do Campo, Ouro Preto/MG) (a); *sinkhole* desenvolvido após exploração de retirada de solo (b)



Fonte: Cherobin (2012); Vacher, Raine e Loch (2004)

Figura 2 - Processo erosivo em forma de ravina (Cabo de Santo Agostinho) (a); voçoroca do Buraco Fundo localizada na cidade de Santa Maria/RS (b)



Fonte: Lafayette (2006); Avila (2009)

Os ensaios utilizados para identificação dos solos dispersivos são divididos por Cruz (2008) em físicos e químicos, sendo os físicos compostos pelo ensaio do *Crumb Test*, ensaio de dispersão por sedimentometria comparativa e *Pinhole Test*, enquanto que os químicos são aqueles referentes à investigação da água intersticial. Goodarzi e Salimi (2015) afirmam que os testes podem dar diferentes resultados para as mesmas amostras de solo, devendo-se utilizar, portanto, mais de um ensaio para identificar a dispersividade dos solos naturais.

Turkoz *et al.* (2014) indica que o *crumb test* mostra bons resultados qualitativos no que diz respeito a identificação do potencial de erodibilidade do solo e de dispersão, podendo ser utilizado em campo para amostras de solo com umidade natural. Para obter o grau de dispersividade, o ensaio faz uso da análise da turbidez da água destilada com a imersão do torrão do solo. Devem ser observadas as reações que o solo apresenta ao longo de uma hora, sendo, ao final do tempo, atribuído determinado grau de dispersividade de acordo com a NBR 13601 (ABNT, 1996b), como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da dispersividade de um solo pelo ensaio do *crumb test*

Grau	Comportamento	Características
1	Não-dispersivo	Não há turvação de líquido, o torrão apenas pode esparramar-se no fundo do béquer
2	Levemente dispersivo	Há indícios de turvação da água próximo ao torrão
3	Moderadamente dispersivo	Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão espalhando-se no fundo do béquer
4	Fortemente dispersivo	Observa-se uma nuvem de colóides e em casos extremos, toda a água torna-se turva.

Fonte: NBR 13601 (ABNT, 1996b) (adaptado)

Um solo dispersivo pode ser mal classificado como solo não dispersivo pelos resultados deste teste, mas uma classificação dispersiva por este é uma forte indicação de que o solo é realmente dispersivo. Dessa forma, se o resultado indicar que o solo é não-dispersivo não é necessário que isso seja verdadeiro, devendo ser feitos outros ensaios para uma caracterização mais precisa.

O ensaio sedimentométrico avalia a dispersividade de um solo argiloso através do comparativo percentual entre as massas de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm obtidos pela norma referente ao método de ensaio de dispersão SCS e NBR 7181 (ABNT, 2017c). Este ensaio é normatizado pela NBR 13602 (ABNT, 1996c), sendo este baseado no proposto pela *Soil Conservation Service* (SCS).

O procedimento desse ensaio pode ser aplicado apenas aos solos que contenham mais de 12% de fração de argila, sendo semelhante ao apresentado pela NBR 7181 (ABNT, 2017c), apresentando diferenças por não utilizar agitação mecânica e dispersão na solução de solo e água.

O ensaio de *Pinhole Test*, também chamado de ensaio do furo de agulha é normatizado pela NBR 14114 (ABNT, 1998b), a partir do qual é possível obter qualitativamente a dispersividade de solos argilosos. Dentre os ensaios físicos, este é o que aponta para resultados mais significativos, devendo, no entanto, realizar uma análise em paralelo aos demais ensaios para chegar a um resultado mais coerente.

A metodologia da norma foi, entretanto, modificada por Santos (1997) no que se refere a análise dos resultados, propondo que seja verificada a vazão e a carga hidráulica tanto no processo de acréscimo quanto no de descarregamento. Mascarenha *et al.* (2015) afirma que “em caso de a fase de descarga apresentar maior vazão do que a fase de carga, isso significa que o solo está sendo erodido internamente. Essa metodologia é adequada para solos mais intemperizados”.

A realização dos ensaios químicos, entretanto, também deve ser realizada, visto que a dispersividade é ocasionada por fatores químicos. Assim, análises como a do pH do solo, quantidade de sais dissolvidos na água intersticial e capacidade de troca catiônica devem ser feitos, indicando a quantidade de íons presentes das partículas de argila e a sua influência no comportamento do solo.

2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD)

A construção civil é um ramo da indústria brasileira que está associada ao crescimento social e econômico, sendo um dos principais geradores de impactos ambientais negativos. Para Leite *et al.* (2018), o impacto sobre o meio ambiente se deve, dentre outros motivos, ao consumo de recursos naturais e a geração de resíduos provenientes de perdas, desperdícios e demolições.

À medida que os recursos naturais extraídos para utilização do setor da construção civil se dispõem no meio ambiente durante o seu ciclo de vida são gerados resíduos, os quais, se dispostos incorretamente, continuam causando relevantes danos ambientais a exemplo da degradação do solo e da contaminação de mananciais (KLEIN; GONÇALVES DIAS, 2017).

Os resíduos advindos da exploração da atividade de construção podem ser obtidos de diversas fontes. O RCD tem sua origem ligada a demolições de edifícios, construção de estradas e a construção ou remodelação de edifícios, podendo conter ainda o solo de escavação da obra (SANTOS, 2015), no entanto, Monteiro Silva (2012) ressalta que ele é conhecido pela sua deposição ilegal em locais inapropriados, gerando diversos problemas.

2.2.1 Definição e classificação de RCD

Os RCD, também chamados de resíduos de construção civil (RCC) são classificados como resíduos sólidos urbanos (RSU), pois estes englobam todos os tipos de materiais resultantes de atividades da população, sejam estas domésticas ou não, que sejam causadores de riscos potenciais ao meio ambiente e/ou à saúde pública.

A Norma Brasileira Registrada (NBR) 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT, 2004a) classifica os resíduos sólidos, estando os resíduos de construção e demolição abrangidos na classe II, que são os resíduos não perigosos, identificados na subclasse B, os considerados resíduos inertes. No entanto, a definição mais utilizada é a estabelecida pela Resolução nº307/2002 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) (BRASIL, 2002):

Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (BRASIL, Resolução nº 307 do CONAMA, 2002, p. 1)

Os resíduos de construção e demolição, portanto, são materiais provenientes de qualquer serviço ligado à engenharia que sejam gerados durante o seu processo executivo, podendo ser advindos diretamente da indústria ou do beneficiamento de matérias-primas naturais, como os agregados, por exemplo.

Para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, de modo que sejam minimizados os impactos ambientais, a Resolução nº 307/2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) enumera definições relativas ao RCD, suas fontes geradoras, transportadoras, beneficiamento, reciclagem e utilização, classificando os resíduos em quatro classes distintas: A, B, C e D. Exceto na classe A, alguns itens foram modificados pelas Resoluções nº 469/2015 (BRASIL, 2015), nº 431/11 (BRASIL, 2011) e nº 348/04 (BRASIL, 2004), respectivamente.

2.2.2 Composição do RCD

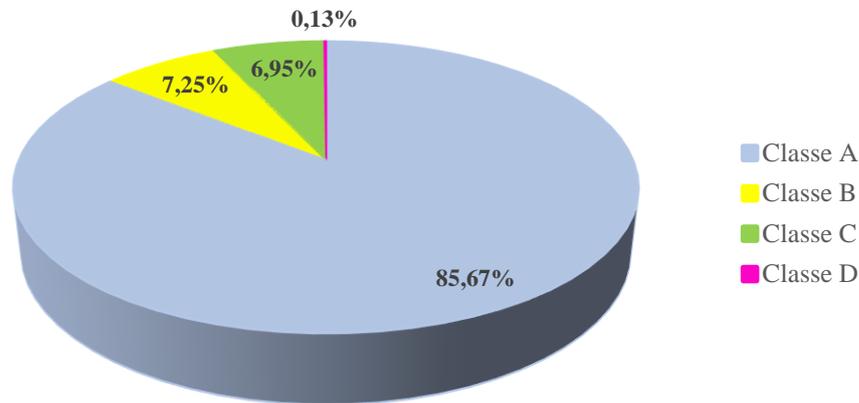
Com a implementação das resoluções do CONAMA, o setor da construção civil passou aos poucos, após a criação de leis municipais, a ter a obrigatoriedade de se adequar perante a produção e destinação desses resíduos, havendo uma preocupação maior inclusive sobre a forma com a qual esses resíduos possam ser reutilizados.

No entanto, para melhor propor soluções de reutilização e reciclagem é preciso verificar anteriormente a composição dos RCD, pois de acordo com a utilização da matéria-prima na execução de obras, os resíduos podem apresentar diferentes características. A composição dos resíduos de construção é dependente das características específicas de cada região, como técnicas construtivas e matérias-primas disponíveis (KIST *et al.*, 2017; FARIAS, 2013; GRUBBA, 2009).

O resíduo tem muitas origens, sendo estas as mais diferentes possíveis de acordo com as fases da cadeia de produção na construção civil, podendo ter sua composição modificada desde a sua produção como agregado natural até depois da demolição das construções. Para ilustrar a

composição gravimétrica, Vieira (2018) analisou os resíduos produzidos em canteiros de obras de edifícios verticais na cidade do Recife (Figura 3).

Figura 3 - Composição gravimétrica média do RCD em Recife/PE



Fonte: Vieira (2018) (adaptado)

Os resultados obtidos mostraram que a maioria dos resíduos gerados em obra é referente a classe A, indicando que a viabilidade de produção de agregados provenientes dos resíduos é alta devido ao grande volume gerado, resultado semelhante ao encontrado por Nagalli (2014), que analisou os tipos de resíduos gerados em cada etapa de uma obra. Tendo em vista tal cenário, faz-se necessário estudar as propriedades que esse material pode apresentar, de acordo com a sua composição, e a influência que ele tem quando misturado ao solo.

2.2.3 Agregado reciclado

Segundo a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) (2017), no ano de 2014 a produção de agregados naturais no Brasil foi estimada em 745 milhões de toneladas, demonstrando uma alta demanda no mercado de importação e exportação. Tendo em vista este cenário, o qual impacta negativamente o meio ambiente por meio da extração de matéria-prima, é preciso que sejam utilizadas novas alternativas de substituição ao uso dos agregados, a fim de que haja uma redução de utilização de matérias-primas naturais.

Uma solução, que a cada dia ganha força dentre os pesquisadores do assunto, é a reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD) e sua reutilização na própria construção civil como matéria-prima alternativa, uma vez que há uma escassez crítica de agregados naturais para a

produção de concreto em muitas áreas urbanas, quando ao mesmo tempo, o aumento das quantidades de RCD gerados nessas mesmas áreas também é considerável.

“A utilização de agregados reciclados é uma alternativa que reduz os impactos ambientais, a utilização de áreas necessárias para o descarte de resíduos da construção e demolição além de evitar a exploração de matérias primas naturais” (PACHECO-TORGAL, 2013, p. 1). Por outro lado, “com a reciclagem, uma outra fonte de matéria-prima é utilizada, proporcionando ainda uma redução na disposição e no volume final dos resíduos” (CABRAL *et al.*, 2008).

Diante da necessidade de reduzir os impactos gerados pela deposição de resíduos e de encontrar uma forma de reaproveitar os resíduos de construção e demolição para outros fins em virtude da redução crescente da disponibilidade de matéria-prima natural, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou no ano de 2004 normas relativas ao uso do RCD na forma de agregado.

As normas incluem ainda diretrizes relativas às áreas de transbordo e triagem, aterros, reciclagem e seu uso na forma de agregados reciclados (Tabela 2). A NBR 15116 (ABNT, 2004, p. 2) define agregado reciclado como: “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura.”

Tabela 2 - Normas referentes aos usos do RCD

Norma	Descrição
15112 (ABNT, 2004b)	Resíduos da Construção Civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação
15113 (ABNT, 2004c)	Resíduos Sólidos da Construção Civil e Resíduos Inertes – Aterros – Diretrizes para projetos, implantação e operação
15114 (ABNT, 2004d)	Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação
15115 (ABNT, 2004e)	Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos
15116 (ABNT, 2004f)	Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos

Fonte: ABNT (2004)

O processo de reciclagem do resíduo diz respeito basicamente à britagem do RCD classe A com o intuito de reduzir o tamanho dos grãos, sendo produzido o agregado reciclado. Araújo (2014) afirma que as etapas de produção do agregado reciclado são basicamente duas: a inicial, contendo a separação e triagem do resíduo que é recebido pela usina de reciclagem, e a segunda

etapa que é a britagem, sendo semelhante aos processos utilizados para a obtenção de agregados naturais.

Em geral, os agregados reciclados são classificados de acordo com os componentes predominantes na sua constituição. Os agregados produzidos por beneficiamento (Figura 4) são classificados em dois tipos pela NBR 15116 (ABNT, 2004), sendo o primeiro designado por agregado de resíduo de concreto (ARC) e o segundo por agregado de resíduo misto (ARM). Na maioria das vezes o resíduo beneficiado, ou seja, que passou pelos processos para separação de contaminantes e redução da granulometria para a produção de agregados, diz respeito ao agregado misto, pois apresenta na sua composição materiais cimentícios e cerâmicos.

Figura 4 - Brita 19 (a) e brita 25 (b) recicladas (material misto)



Fonte: A autora

2.2.4 Uso do RCD como agregado e suas propriedades

Muitas pesquisas vêm desenvolvendo alternativas para a utilização do RCD com aplicação na própria construção civil para diversos fins. O RCD tem sido utilizado como agregado em diversas produtos e serviços, como argamassas, blocos de vedação, pavimentação, aterros e até mesmo na produção de concreto estrutural, podendo ser incluído na produção de diversos itens para a construção civil e infraestrutura urbana.

O uso do agregado reciclado nas formas citadas é uma alternativa benéfica em muitos aspectos. Isto se deve ao fato de apresentar ganho econômico e ambiental, pois, reduz-se a exploração de jazidas e a deposição irregular do RCD no meio ambiente, além de ampliar as alternativas de

materiais disponíveis para reuso na indústria da construção civil (ALMEIDA *et al.*, 2018; FUJI; CARVALHO, 2014; SALES; FILHO, 2014).

No entanto, é necessário analisar os efeitos da composição do reciclado e das suas propriedades, pois elas interferem diretamente no comportamento do material para o qual será utilizado. Aspectos como sua alta taxa de absorção, menor massa específica e menor trabalhabilidade devem ser considerados na determinação do uso ao qual se quer aplicar o RCD (SILVA; VILELA, 2018; FIGUEIREDO, 2011).

As frações compostas de concretos estruturais e de rochas naturais podem ser utilizadas quase que em sua totalidade como agregado para materiais cimentícios. Neste caso, a resistência à compressão é um fator positivo, pois em geral, apresentam resultados satisfatórios (SILVA e VILELA, 2018). Já a presença de materiais mais porosos como, argamassas e material cerâmico causa um enfraquecimento do agregado gerado, além de um produto com maior absorção de água (PERIUS, 2009).

Para verificar o potencial de utilização do RCD nos diversos usos, têm sido feitas pesquisas que buscam estudar as propriedades do agregado, seja em solos, concretos ou para outros fins. Campos *et al.* (2018) aplicaram o RCD em substituição de 20% de agregados naturais para produção de concretos autoadensáveis, verificando que não houve redução significativa nas propriedades mecânicas.

Silva (2018) estudou o comportamento hidromecânico de misturas de solo, RCD e resíduos de pneus, obtendo-se com o RCD resultados satisfatórios quanto às propriedades hidráulicas e modificação das tensões cisalhantes. Lima (2016) caracterizou os resíduos oriundos de escavação de estacas hélice contínua, concluindo que este material possui propriedades geotécnicas excelentes.

No contexto da aplicação do RCD em solos, Viana e Lafayette (2016) estudaram a sua incorporação em tijolos de solo-cimento, apresentando resultados satisfatórios quanto às propriedades tecnológicas aos 28 dias, exigidas por norma para o emprego de solo-cimento. Contreras *et al.* (2016) utilizou o agregado reciclado para produzir tijolos com adição de cal e cimento para atender às propriedades ligantes, obtendo resultados positivos quanto à resistência

a compressão, os quais apresentaram valores superiores a 4 MPa, superando o valor solicitado por norma.

Resultados positivos foram obtidos por Fuji e Carvalho (2014), referentes à estabilidade estrutural do material composto por RCD de concreto britado em camadas de pavimento, quando aplicado junto a um solo tropical e à cal virgem hidratada. Considerando os valores de capacidade de suporte, de acordo com Palacio (2014), a mistura composta por resíduo de construção e demolição reciclado mostra melhora, quando se faz a comparação junto ao solo sem adição.

Fuji (2012), através de estudo de misturas com cal, RCD e solo para uso em obras rodoviárias, detectou que a presença do RCD e da cal reduzem a massa específica real dos grãos e melhoram o comportamento resiliente do solo. Entretanto, foi verificado o aumento do índice de vazios e da porosidade, que se deve em parte à presença do agregado reciclado. A porosidade e a absorção de argamassas produzidas com agregados reciclados foram estudadas por Lima e Leite (2012), demonstrando que a quantidade de água presente nos seus poros influencia a formação de espaços vazios capilares, aumentando a demanda por água.

O estudo de Oliveira *et al.* (2011) teve como objeto a mistura de solo com RCD e fibras de polipropileno com vistas ao melhoramento das suas propriedades geotécnicas. Foram estudadas as propriedades físicas e mecânicas da mistura por meio de ensaios laboratoriais, os quais constataram o bom desempenho mecânico do material para aplicação em obras geotécnicas.

2.3 Cal

A cal é definida como sendo o óxido de cálcio ou a mistura de óxidos de cálcio e de magnésio advindos da calcinação do metal cálcio, o qual é advindo das rochas calcárias possuindo o carbonato de cálcio como principal componente. Sua representação é feita pela fórmula molecular CaO ou CaO. MgO, tendo esta última a combinação com o metal magnésio, sendo ambas chamadas de cal virgem (VASCONCELOS, 2016; AZEVÊDO, 2010).

A cal hidratada, por sua vez, é definida pela NBR 7175 (ABNT, 2003a) como o produto da hidratação do pó da cal virgem, tendo como principais componentes as misturas de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou, destes materiais somados ao óxido de magnésio. De

acordo com a composição química, a NBR 7175 (ABNT, 2003a) divide a cal hidratada em três denominações distintas: CH - I, CH - II e CH - III. Esta classificação é dada de acordo com o grau de pureza das cales, sendo a CH - I a mais pura e a CH-III a que apresenta menor grau. A mesma norma estabelece critérios de aceitação do ponto de vista físico (Tabela 3) e químico para cada classificação.

Tabela 3 - Exigências físicas para as cales

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3%	≥ 2,5%	≥ 2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175(ABNT, 2003a) (adaptado)

Guimarães (2002) analisou diferentes tipos de cales e fez uma classificação por tipo, considerando o percentual de seus materiais constituintes e suas propriedades. O autor as classificou em cal virgem cálcica, cal hidratada cálcica, cal hidratada dolomítica ou magnesiana e cal virgem dolomítica ou magnesiana (Tabela 4).

Tabela 4 - Composição média das cales brasileiras

Tipo de cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	$Fe_2O_3 + Al_2O_3$ (%)	Perda ao fogo (%)	CO_2 (%)	SO_3 (%)	CaO + MgO (%)	MgO Não Hidratada(%)
Cal Virgem Cálcica	90-98	0,1-0,8	0,5-3,5	0,2-1,0	0,5-5,0	0,2-3,8	0,1-0,6	96,0-98,5	-
Cal Hidratada Cálcica	70-74	0,1-1,4	0,5-2,5	0,2-0,8	23-27	1,5-3,5	0,1-0,0		0,5-1,8
Cal hidratada Dolomítica	39-61	15-30	0,5-18,2	0,2-1,5	19-27	3,0-6,0	0,02-0,2	76-99	0,5-1,8
Cal virgem Dolomítica	51-61	30-37	0,5-4,5	0,2-1,0	0,5-4,8	0,5-4,5	0,05-0,1		-

Fonte: Guimarães (2002)

2.4 Estabilização de solos

A necessidade de alterar as características de um solo para torná-lo adequado ao uso de acordo com às solicitações de carga demandadas por um dado projeto, conduz ao estudo das formas de modificação para melhoramento das suas propriedades físicas, mecânicas ou químicas. Nesse contexto, a estabilização de solos se mostra de fundamental importância, pois busca através de alterações nas propriedades iniciais do solo, melhorar o seu comportamento.

O conceito de estabilização é descrito por Carmo (2015), para o qual a estabilização de solos consiste na alteração das características e propriedades do solo, a exemplo da sua resistência, compressibilidade e sensibilidade à ação de variações externas para melhorar o seu comportamento.

A estabilização objetiva ainda, de acordo com Gandolfi e Cardoso (2013), além da melhoria nas propriedades do solo nas condições naturais, atuar como meio preventivo contra as condições adversas desenvolvidas ora durante a construção da obra, ora quando de sua utilização com a vida útil de projeto.

Tendo em vista tal informação, é possível inferir que se pode melhorar as características do solo apenas para o período da construção, de forma não permanente, mas sem adição de materiais, e de maneira permanente com inserção de materiais. Os processos relativos à estabilização dos solos podem ser feitos através de correção da granulometria, plasticidade e por meio de adição de materiais que aumentem a coesão dos grãos do solo (BORDIGNON *et al.*, 2016).

Vasconcelos (2016) divide os métodos de estabilização em mecânicos, físicos e químicos. Segundo ele os processos mecânicos se parecem com os físicos nos quais ocorre a mistura de mais de um solo com distribuição granulométrica distinta. Por isso, pode ser chamada de estabilização granulométrica.

A estabilização química, no entanto, diz respeito a adição de substâncias ou produtos químicos que tem a função de reagir com o solo objeto de estudo, para atender às características e propriedades necessárias ao uso a que se destina. Dentre as substâncias que podem ser adicionadas ao solo, para fazer o papel de agente estabilizador, destacam-se a cal e o cimento.

2.4.1 Estabilização granulométrica

O princípio da estabilização granulométrica diz respeito ao emprego de um material ou à mistura de dois ou mais materiais que sejam adequados para uma determinada especificação a fim de que se resulte em um novo material no qual a resistência seja garantida pelo contato entre as partículas, conferindo menor permeabilidade e maior densidade (ARRIVABENI, 2017; GONDIM, 2008).

A estabilização granulométrica, portanto, objetiva conferir um produto final de estabilidade superior em relação ao solo de origem, para cada caso específico, por meio de uma combinação de diferentes granulometrias por adição, substituição ou retirada de solos e agregados.

Existem dois fatores determinantes para o comportamento da composição granulométrica: a natureza da partícula e a densidade ótima (ARRIVABENI, 2017; PATRICIO, 2015). O primeiro deles deve apresentar resistência suficiente para que não sofram alterações ao longo da vida útil. Já para o segundo, deve-se atingir a densidade ótima, pois neste caso é obtido o melhor arranjo das partículas, distribuindo mais uniformemente os esforços .

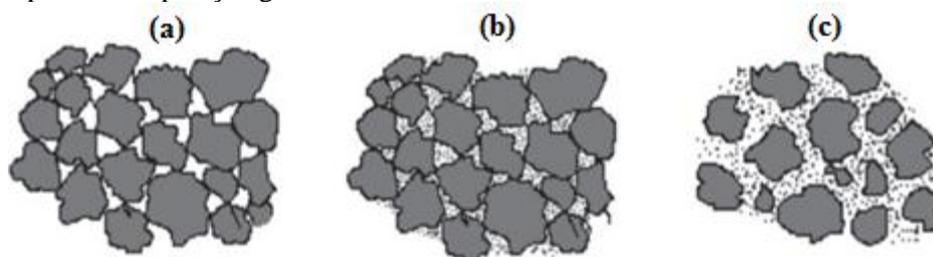
Tendo em vista tais informações, o arranjo ideal do solo é aquele no qual o solo seja bem graduado, pois neste obtém-se um solo bem graduado com melhoria de resistência mecânica do solo e no desgaste à erosão. Para Maia (2014), na estabilização granulométrica, deve-se utilizar agregados de diferentes granulometrias para que os vazios gerados entre os agregados graúdos sejam preenchidos pelos agregados médios, e os vazios deixados por estes preenchidos pelos agregados miúdos.

Assim, para obter as características ideais de resistência e trabalhabilidade deve-se utilizar de misturas que contemplem solos com características granulares, a exemplo da areia, e de solos com características coesivas. Pires (2014), descreve três arranjos granulométricos (Figura 5), sendo o primeiro composto por grãos de dimensões maiores e ausência de grãos finos, o segundo por partículas de tamanhos distintos para compensação de espaços vazios, e o um material com predominância de materiais finos.

Respectivamente, as composições citadas possuem: distribuição de esforços ineficiente devido à falta de grãos finos; arranjo ideal para um solo, no qual os espaços vazios são ocupados por

grãos menores, havendo maior distribuição de carga; menor resistência mecânica pois os grãos possuem dimensões pequenas, não distribuindo os esforços para partículas de granulometria superior.

Figura 5 - Tipos de composição granulométrica



Fonte: Marques (2009)

De forma a melhorar a distribuição granulométrica de um solo e contribuir para solucionar a problemática do uso de resíduos da construção e demolição, tem sido feitas propostas em diversos trabalhos com enfoque para a utilização de agregados de RCD como alternativa de substituição ao agregado natural. Por ser um material inerte e com comportamento semelhante ao agregado natural, o RCD mostra-se como uma possibilidade viável do ponto de vista econômico e ambiental.

O agregado reciclado foi estudado por Silva (2017) com percentuais de mistura de 15%, 30% e 45% no solo para investigar a influência do tempo de cura nas características mecânicas à compressão simples. O resultados obtidos demonstram que para os primeiros percentuais a resistência a compressão do compósito foi aumentada à medida que o tempo de cura aumentou.

A adição de RCD em solo para produção de tijolos à base de solo-cimento foi estudada por Martins, Fernandes e Campos (2016), através de adições de 40% e 60% de resíduo na massa da mistura, as quais interferiram positivamente conferindo melhoras relativas à resistência à compressão, ao arranjo granulométrico e aumento da umidade ótima. No entanto, os melhores resultados se referem às amostras com 40% de RCD.

O estudo de Macedo (2016) utilizou misturas de um solo oriundo de uma encosta da cidade do Recife/PE com RCD, em proporções de 10%, 20%, 30% 40% e 50%. Os resultados demonstraram que o RCD pode ser utilizado como uma alternativa viável de melhoramento de solos, contribuindo positivamente para a resistência ao cisalhamento, com melhor resultado referente à mistura de solo com 30% de RCD.

Leite *et al.* (2016) analisaram o melhoramento do comportamento do solo com brita e RCD proveniente de pavimentação, o qual apresentou acréscimo dos parâmetros de resistência e valores de CBR, fazendo uso do percentual resíduo variando de 26% a 43% em massa da amostra misturada ao solo, obtendo melhores resultados para o compósito com 43% de RCD.

O melhoramento de um solo colapsível foi estudado por Neto (2015). O autor utilizou o RCC como material estabilizante, e seus resultados demonstraram que a adição de resíduos incorporados modifica a granulometria do solo, tornando-o uniforme. O aumento percentual de RCC impactou na redução da compressibilidade do solo e do potencial de colapso, sendo uma alternativa para melhoramento de suas características indesejadas.

Diferentes percentuais de mistura de solo, RCD, cimento e fibras foram utilizados para o melhorar o solo e viabilizar a utilização do agregado reciclado para fins de pavimentação. Para tanto, Macedo (2013) aplicou o solo argiloso junto ao RCD com percentuais de 25%, 50%, 75% e 100% em massa da amostra, aliado a 2% em massa de cimento, junto a percentuais que variam de 0 a 0,75% de fibra.

No estudo de Macedo (2013), quanto às propriedades mecânicas, foram obtidos os melhores resultados com 50% e 75% de agregado reciclado e maior percentual de fibras. Já em relação à resistência à compressão simples, as amostras compostas por 50% em massa de RCD apresentaram maiores ganhos.

Jiménez (2011) estudou a utilização de RCD para fins de pavimentação, obtendo bons resultados no que concerne à resistência, medida através do CBR, aos valores de desgaste e durabilidade, não atendendo, porém, aos limites de liquidez e plasticidade. Verificou ainda que o teor médio de absorção foi superior ao dos agregados naturais, não impactando, no entanto, o comportamento final da mistura.

2.4.2 Estabilização química

A estabilização química diz respeito aos procedimentos nos quais adiciona-se um material químico, cimentante ou não, ao solo, para que sejam conferidas melhorias nas propriedades geotécnicas, sendo os estabilizantes mais empregados a cal e o cimento (PATRICIO, 2015).

Brito e Paranhos (2017) apontam que quando se adicionam estabilizadores ao solo natural ocorrem reações químicas que contribuem para a obtenção da umidade ótima em uma compactação, promovendo o preenchimento dos poros e melhorando as propriedades físicas e mecânicas do solo. Afirmam ainda que os resultados alcançados dependem das reações químicas que ocorrem entre os minerais componentes do solo e o agente estabilizador.

A técnica de estabilização química possibilita que características como a resistência à compressão simples, resistência ao cisalhamento e a permeabilidade sejam melhoradas. A aplicação de compostos químicos, além de aprimorar as propriedades citadas, pode proporcionar aumento de rigidez e redução da compressibilidade do solo (CHOOBBASTI; KUTANA EI, 2017), sendo considerada um procedimento relativamente fácil e versátil de ser executado por Bordignon *et al.* (2016).

De acordo com Figueiredo (2011), a cal é utilizada como aditivo para tratamento de solos e outras aplicações como um dos mais antigos métodos de alteração das propriedades dos solos. Sendo assim, a mistura solo-cal, como é chamada a junção de água, solo e cal em uma dada dosagem, pode ser utilizada como alternativa para tratamento de solos.

De maneira geral, utiliza-se a cal hidratada como estabilizante de solos, pois, apesar de a cal virgem possuir maior teor de CaO e MgO, a sua aplicação demanda mais cuidados no que diz respeito à segurança dos trabalhadores (AZEVEDO, 2010).

As propriedades que podem ser alteradas ao adicionar a cal como estabilizante são a plasticidade, a durabilidade e o potencial erosivo, no entanto, Umesha, Dinesh e Sivapullaiyah (2009) destacam que a adição de cal deve ser feita com um teor ótimo de cal, quantidade esta que aumenta a resistência do solo em seu valor máximo. O percentual acrescentado ao solo deve ser calculado em relação à massa seca, quando se trata de estabilização de solos dispersivos. Para isso, Cruz (2008) sugere que em projetos, o valor a ser utilizar gira em torno de 1% a 4%.

Segundo Batalione (2007) as modificações no comportamento do solo com a adição de cal se devem a quatro reações, sendo elas: a troca catiônica, a floculação e aglomeração, reação pozolânica e carbonatação. A primeira delas se deve à troca entre os íons de cálcio presentes na cal com os íons de sódio e magnésio presentes nas partículas de argila. A segunda é responsável por alterar a textura das partículas, devido ao aumento do pH.

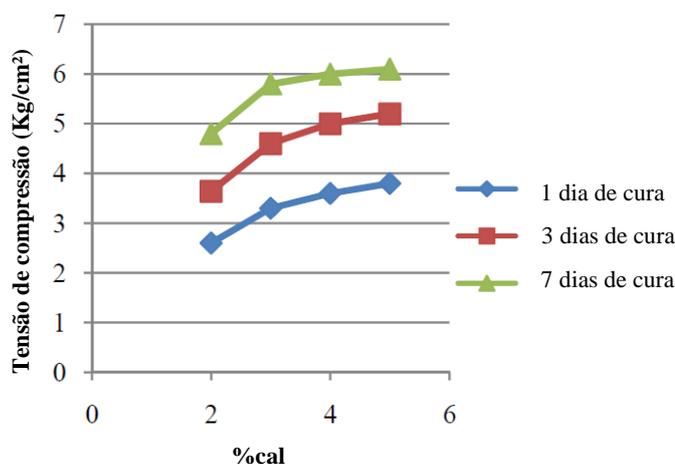
A reação pozolânica provoca aumento de resistência devido às reações entre a cal e os argilominerais, tendo como resultado a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, funcionando como componentes cimentícios. Já a carbonatação é uma cimentação advinda da reação do óxido e hidróxido de cálcio com o anidro carbônico, provocando no solo a longo prazo, a sua estabilização.

No que concerne à utilização da cal como estabilizante de solos, inclusive os dispersivos, têm sido desenvolvidas diversas pesquisas envolvendo diferentes percentuais de utilização. Como uma alternativa de escolha do teor ótimo de cal para estabilização, Ferreira *et al.* (2017) utilizaram o critério de Eades e Grim (1966). Tal metodologia propõe que o menor teor de cal que estabiliza a mistura de um solo é quando ocorre uma elevação do pH a 12,42, quando misturados por uma hora em água destilada.

Utilizando o pH como parâmetro, Villalba (2015) propõe que o teor estabilizante de cal é aquele estudado por Eades e Grim (1966) ou, caso não seja atingido este valor, deve-se identificar o comportamento máximo constante do pH, à medida que se aumenta o percentual de cal, mostrando assim, que a reação com a cal atingiu seu limite máximo.

Rajesh e Marimuthu (2015) utilizaram a cal em um solo dispersivo com concentrações de 2%, 3%, 4%, e 5% em relação ao peso seco do solo, o qual teve a sua característica dispersiva estabilizada e resistência à compressão acrescida. O melhor resultado é correspondente à concentração de 3% de cal, pois representa o maior aumento percentual de resistência, enquanto com 4% e 5% de cal, apesar de apresentar aumento de RCS, eleva-se o custo da mistura.

Figura 6 - Resistência à compressão simples de solo dispersivo tratado com cal



Fonte: Rajesh e Marimuthu (2015) (adaptado)

Foi visto que o solo passou de um comportamento dispersivo para não-dispersivo no estudo de Samaniego (2015), o qual utilizou os teores de 1%, 2%, 3%, 5% e 7% de cal para estabilização de um solo silto-argiloso dispersivo, erodível e de origem sedimentar. As adições de 2% e 3% promoveram o resultado proposto pela investigação, sendo a resistência à compressão aumentada tanto quanto se elevou o teor de cal da mistura até o valor de 3%.

A quantidade de cal aplicada na pesquisa de Fuji e Carvalho (2014) foi de 4% da massa total da mistura de solo tropical e RCD, obtendo como resultado uma redução do índice de vazios devido a sua ação agregadora, além de melhorar o comportamento resiliente do solo. O estudo dos mesmos componentes foi feito com aplicação na produção de tijolos por Figueiredo (2011). O autor estudou as porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de cal na massa total de solo, apresentando maiores resultados com 7,5% de cal e 2,5% de RCD em relação à compressão simples.

Como visto, as pesquisas utilizam diferentes dosagens de cal para verificação do comportamento relativo à sua estabilização, sendo feitas tentativas em laboratório ou *in loco* para escolher o percentual ideal. Isto ocorre porque não há uma norma especificando o teor ideal de cal para determinados solos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

São apresentadas as informações relativas à área de retirada do solo, como localização, aspectos históricos, características da população residente, vegetação, clima, relevo, solo, hidrografia e geologia. Com essas informações é possível conhecer melhor a dinâmica da região, verificando como o solo da encosta pode interferir no cotidiano da população.

3.1 Localização da área

A Ilha de Itamaracá está localizada no litoral norte do Estado de Pernambuco, estando contida na Região Metropolitana do Recife (RMR). O município dista de 44 km da capital do Estado e possui uma área de 66,6 km², a qual é acessada pela rodovia BR 101 norte. A cidade possui uma população de 21.884 habitantes (IBGE, 2010) distribuídos na unidade territorial com densidade demográfica de 328,17 hab/km². No ano de 2017 foi estimada a população, obtendo-se 25.789 habitantes (IBGE, 2017).

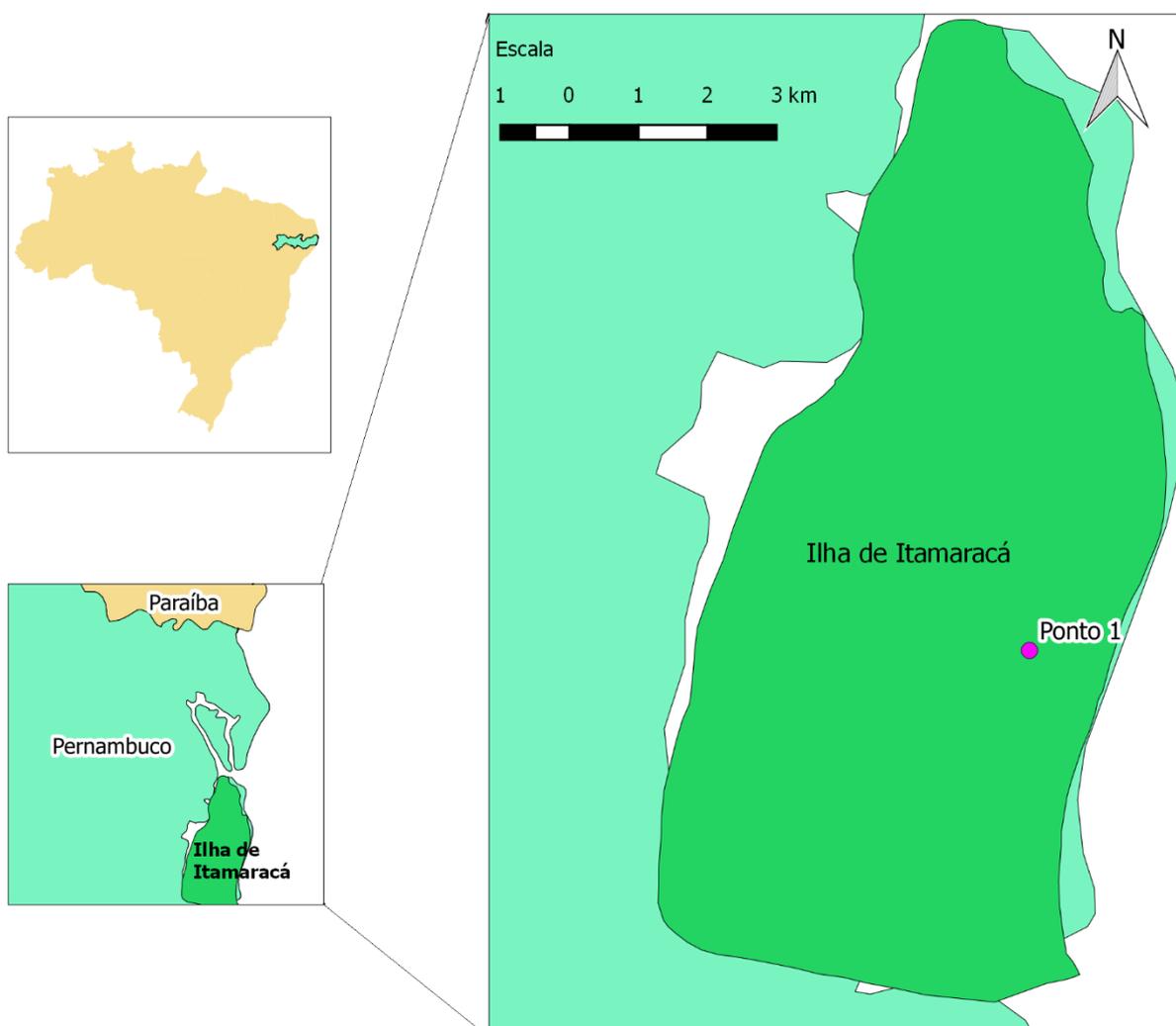
O município se limita ao norte com a cidade de Goiana, a oeste com o município de Itapissuma, ao sul com a cidade de Igarassu e ao leste com o Oceano Atlântico. Esse destino é muito conhecido e procurado pelas suas praias e pelo seu patrimônio histórico, sendo um ponto turístico notável para a comunidade do local e do Estado. Entretanto, é notável grande número de encostas que apresentam processos erosivos avançados, cujos efeitos deixam em risco a localidade.

O solo utilizado nesta pesquisa está inserido numa encosta do município, a qual é objeto de estudo de Bezerra (2018). A área é uma antiga jazida de extração de saibro, estando desativada há cerca de 30 anos. Observa-se um avançado estágio de processos erosivos, os quais foram causados pelo escoamento superficial atuante ao longo do tempo, provocando carreamento de partículas dos solos.

A localização da encosta no município é representada pelas coordenadas 7° 46' 9'' S e 34° 50' 28'' W (Figura 7), em uma posição geográfica com altura aproximada de 40 metros em relação ao nível do mar. Apesar de ser uma área particular, há ocupação pela população no entorno da região, com construção de casas na parte mais alta do talude. O entorno da encosta é circundado

também por uma rodovia, estando essa área submetida a um alto potencial de risco, devido às características de erosão encontradas no local.

Figura 7 - Localização da área de estudo da pesquisa



Fonte: A autora

3.2 Aspectos gerais do município

Itamaracá, nome oriundo dos povos indígenas (IBGE, 2018) que significa pedra que canta, é um município que representa um importante valor histórico para o Estado de Pernambuco, isto pois, sabe-se que há registros que indicam a presença de habitantes desde antes do ano de 1500. Segundo a Base de Dados do Estado de Pernambuco (BDE, 2006), existem relatos da presença de naufragos portugueses e franceses do ano de 1493 e 1498, respectivamente. O distrito de Itamaracá foi criado em 1866, mas tornou-se município apenas no ano de 1958, tendo por sede o distrito do Pilar, desvinculando-se de Igarassu (CONDEPE/FIDEM, 2006).

Analisando a população dos censos dos anos 2000 e 2010, com 15.858 e 21.884 habitantes (IBGE, 2017), respectivamente, verifica-se que se o município apresentou uma taxa pequena de crescimento. Segundo dados do PNUD, Ipea e FJP (2010) a taxa média anual foi de 3,27%, tendo a população um índice de desenvolvimento humano médio (IDHM) de 0,653 no mesmo ano, sendo classificado como médio, em uma escala de 0 a 1 (PERNAMBUCO, 2013).

A atividade turística é a base da economia local, estando nesta inclusos os turismos relacionados às praias, ao patrimônio histórico, ao ecoturismo e a projetos que possuem instalações físicas no município, como o Projeto peixe-boi (CANDIDO, 2017).

A modificação da área de vegetação nativa por instalações urbanas é um dos pontos que tem modificado negativamente o espaço do município. A faixa litorânea, tende a adensar a ocupação urbana, trazendo, portanto problemas que motivam a erosão acelerada e o recuo da linha de costa (CPRH, 2001). Isso ocorre não apenas na faixa de praia, mas também nas áreas de rodovias.

3.3 Aspectos físicos

Os diferentes aspectos físicos podem ser determinantes no comportamento de um solo em uma dada localidade, e, por isso, é importante destacar suas características mais preponderantes. São listados na Tabela 5 os principais fatores influenciadores, como vegetação, clima, relevo, solo, geologia e hidrografia, no município e na localidade da encosta.

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2005), a vegetação mais preponderante na extensão do território do município é formada por florestas perenifólia de restinga. A cobertura vegetal existente reflete o clima dominante, sendo em sua maioria a Mata Atlântica (VARELA, 2010).

Entretanto, na encosta não se observa a presença de cobertura vegetal. Nos dias atuais, a Mata Atlântica vêm sendo substituída gradativamente por mata alterada pela ação antrópica, ou pelo agroecossistema do coco-da-bahia, ocupando áreas localizadas principalmente no sul da ilha (ALMEIDA, 2011).

Tabela 5 - Aspectos físicos destacados no município da Ilha de Itamaracá e na localidade da encosta

Aspecto físico	No município	Na área de estudo/encosta	Observações relevantes
Vegetação	Floresta perenifólia de restinga (CPRM, 2005)/Mata Atlântica (VARELA, 2010)	Não há vegetação nos patamares da encosta	Ação antrópica retirando vegetação nativa para urbanização ou uso para plantio de coco-bahia (ALMEIDA, 2011)
Clima	Tropical quente e úmido (SILVA, 2012)/Tropical chuvoso de verão seco (CPRM, 2005)/Concentração de chuvas entre março e agosto (APAC,2017)	Tropical quente e úmido (SILVA, 2012)/Tropical chuvoso de verão seco (CPRM, 2005)/Concentração de chuvas entre março e agosto (APAC,2017)	A precipitação de chuvas afeta o carreamento de partículas por meio do escoamento superficial, favorecendo os processos erosivos
Relevo	Restingas, dunas e mangues (LIMA; GONÇALVES; SCHMIDT, 2017)/Norte (planícies)/Sul (relevo colinoso) (VARELA, 2010)	Relevo colinoso	-
Solo	Gleissolos (areia quartzosa marinha), argissolos (podzólico amarelo) e os espodosolos (solos de mangue) (EMBRAPA, 2006)	Predominam argissolos	Presença de argila, podendo conter areia (CPRM, 2014a); Solos muito erodíveis
Geologia	Barreiras, Gramame, Maria Farinha e depósitos flúvio-marinhos (CPRM, 2005; CPRM, 2014b)	Predominam solos de Formação Barreiras	Areias feldspáticas claras, incoerentes, de granulação fina a média, com alternância de argilas (CPRM, 2005)/Pode estar junto com Formação Gramame

Fonte: A autora

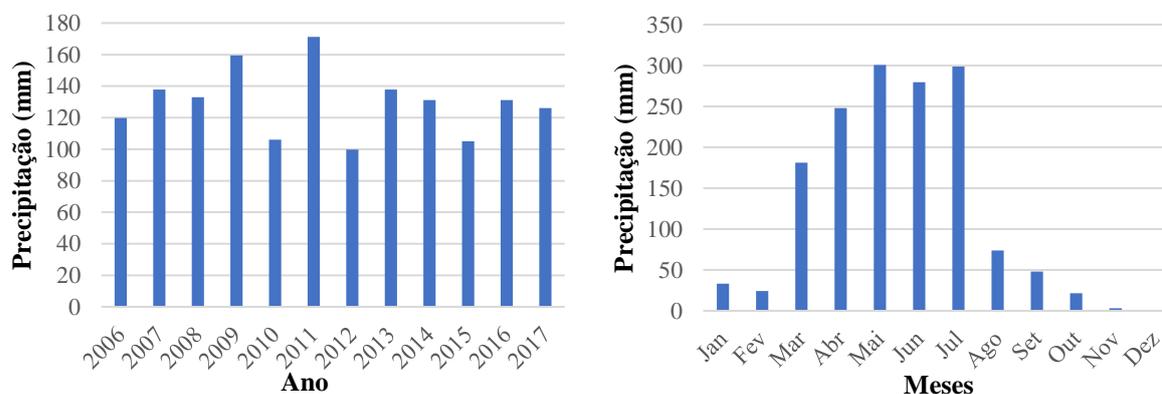
Com relação ao clima, Silva (2012) afirma que na região o clima se apresenta como tropical quente e úmido (As') pela classificação *Koppen*, com chuvas de ocorrência entre os meses de março a agosto. Já a CPRM (2005) aponta o clima do município como tropical chuvoso de verão seco. Em seu estudo, Oliveira (2016) informa que a temperatura média mensal varia entre 25 °C e 27 °C.

De acordo com dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2017), utilizando como referência os anos compreendidos entre 2006 e 2017, verifica-se que as precipitações médias mensais, são em geral, superiores a 100 mm, conforme ilustrado na Figura 8a. Tal informação é reiterada por Silva (2012) e Varela (2010).

Na Figura 8b é apresentado o comportamento pluviométrico ao longo dos meses, utilizando o ano de 2017 como referência. Por meio dela, verifica-se que a concentração das chuvas de fato ocorre nos meses que vão de março a agosto, com totais mensais que chegam a atingir os 300

mm. Na área de estudo este volume afeta o carregamento de partículas por meio do escoamento superficial, favorecendo os processos erosivos.

Figura 8 – Precipitações médias mensais dos anos compreendidos entre 2006 e 2017, no município da Ilha de Itamaracá (a); Precipitações mensais do ano de 2017, no município da Ilha de Itamaracá (b)



Fonte: APAC (2017)

Quanto ao relevo, a cidade de Itamaracá está contida em uma unidade geoambiental, formada por áreas arenosas litorâneas, nas quais se incluem as restingas, dunas e mangues (LIMA; GONÇALVES; SCHMIDT, 2017). Segundo Varela (2010), na porção norte da Ilha de Itamaracá pode ser observada a preponderância dos tabuleiros e da planície costeira, enquanto que na porção sul há a maior presença de relevos colinosos, existindo nela ainda a planície costeira. A área de estudo está localizada na porção mais ao sul, e por isso se enquadra como relevo colinoso.

Em relação aos solos, destacam-se, por meio da Figura 9, a presença dos gleissolos (areia quartzosa marinha), argissolos (podzólico amarelo) e os espodossolos (solos de mangue). Os solos podzólicos amarelos são os predominantes na área da encosta de estudo. Os argissolos estão enquadrados em uma classe que possui grande variedade de características, sejam físicas, químicas, mineralógicas ou morfológicas. Eles podem apresentar as cores amarela, vermelha e/ou acinzentada, possuindo acentuada presença de argila, podendo, porém ter a presença de areia (CPRM, 2014a). São considerados como solos facilmente erodíveis.

Um fator determinante para a existência de determinados solos é a sua geologia. Segundo a CPRM (2005), a Ilha de Itamaracá está contida, geologicamente, na Província Borborema,

sendo constituída pelas Formações, Barreiras, Gramame, Maria Farinha e depósitos flúvio-marinhos (Figura 10).

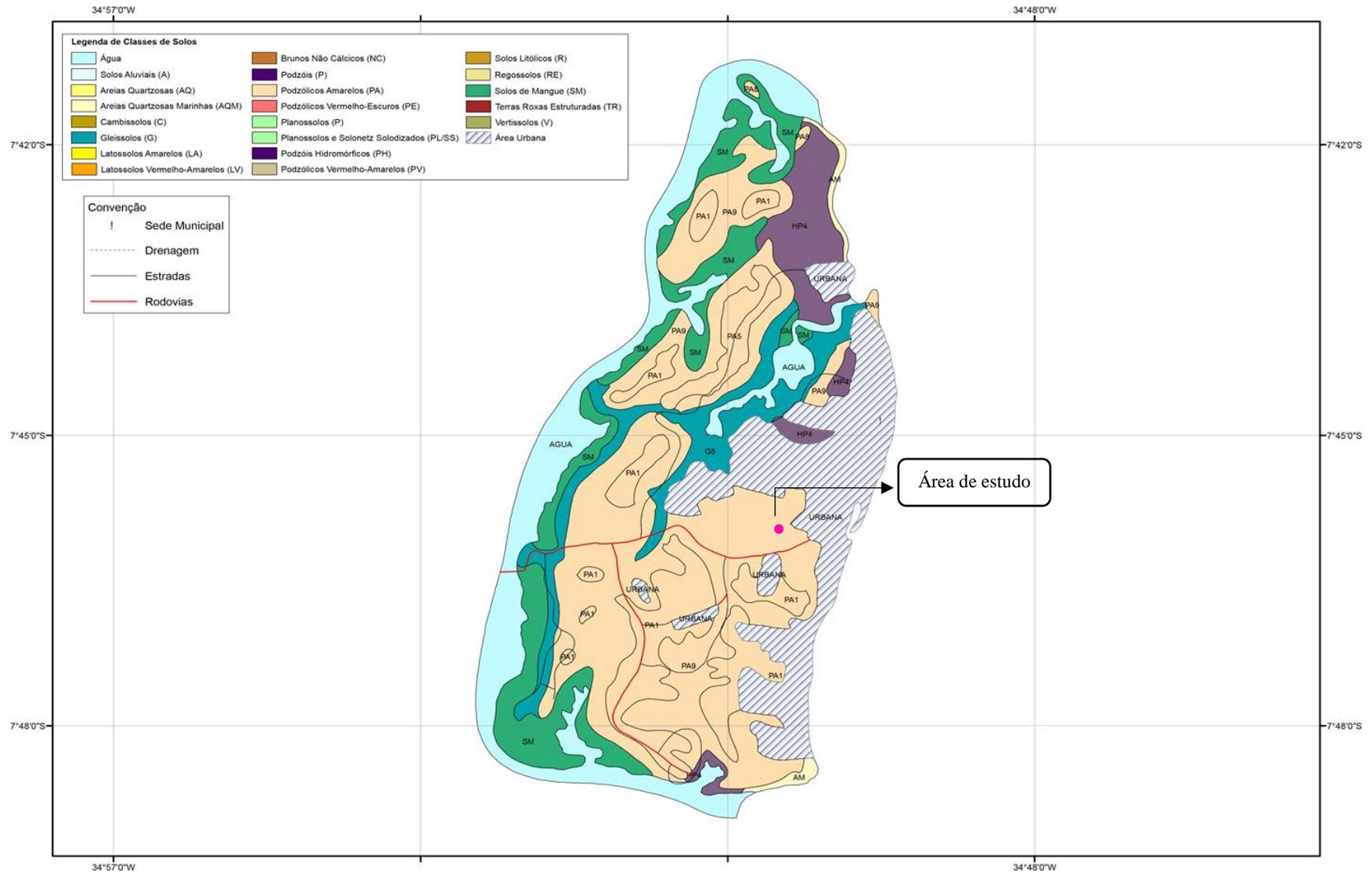
A Formação Barreiras, na Ilha de Itamaracá, ocupa, junto à Formação Gramame, a maior parte do território. Conforme aponta Varela (2010), esta formação se distribui como uma faixa que acompanha a linha de costa, apresentando largura variável. Silva (2004), aponta que as características mais marcantes dessa formação na ilha são as areias feldspáticas claras, incoerentes, de granulação fina a média, com alternância de argilas cinza-esverdeada.

A Formação Gramame, por sua vez, é de origem marinha (CPRH, 2001), e normalmente se apresenta coberta por sedimentos da Formação Barreiras, podendo ser constituída por calcários areno-argilosos e argilosos. Por esse motivo, muitas vezes solos de Formação Barreiras e de Formação Gramame podem estar associados.

A hidrografia do município é basicamente composta pelo canal de Santa Cruz, pelo rio Timbó e pelo rio Jaguaribe, sendo o primeiro destes considerado como a principal feição hidrográfica (VARELA, 2010). Segundo Almeida (2011), o canal de Santa Cruz compõe a rede de drenagem com uma descarga média total de aproximadamente 55,9 m³/s no inverno e 0,8 m³ no verão, possuindo uma forma de U alongado, com largura que atinge 1,5 km em alguns trechos e 22 km de extensão.

O local de estudo está inserido em uma região na qual predominam os solos de Formação Barreiras, tendo, portanto, grande quantidade de areia, com presença de argila em parte da localidade. No que se refere ao solo, são encontrados em maior proporção os argissolos, seguidos pelos gleissolos, porém, o solo de estudo enquadra-se na classificação de gleissolos por possuir maior quantidade de areia em sua composição.

Figura 9 - Mapa dos tipos de solo do município da Ilha de Itamaracá



Fonte: Embrapa (2006)

Figura 10 - Mapa geológico da Ilha de Itamaracá



Fonte: CPRM (2014b) (adaptado)

4 METODOLOGIA

São apresentadas as informações relativas ao desenvolvimento da pesquisa no que concerne ao programa experimental, sendo dividido em quatro etapas para melhor definição da sequência executiva dos ensaios.

Na primeira etapa foi realizada a escolha e coleta dos materiais que foram utilizados para o desenvolvimento deste estudo, e a preparação das suas amostras. Para isso, primeiramente foi feita a visita em campo na qual, verificou-se o aspecto da encosta, que apresenta ação de processos erosivos.

Em seguida, foram utilizadas as amostras da encosta de diferentes camadas, coletadas por Bezerra (2018), para executar o ensaio do *Crumb Test*. Posteriormente, com a definição da camada de solo mais dispersiva, coletou-se a amostra de solo, o RCD e a cal. Com os materiais foram preparados os compósitos de solo e RCD.

Na segunda etapa foram feitos os ensaios de caracterização física e química, utilizando o solo e o RCD, individualmente, e os seus compósitos, aplicando-se as metodologias para execução dos ensaios de granulometria, densidade real e limites de Atterberg. No caso particular do solo e RCD, também foram feitos os ensaios mineralógicos, e apenas no solo, o ensaio de expansibilidade.

Para a caracterização química, foram verificados os componentes principais do solo, complementando os resultados obtidos com a fluorescência de raio X, sendo este último ensaio também feito no RCD. Para o pH, foram utilizados o solo, RCD e compósitos, a fim de que fosse possível definir os percentuais de trabalho, referente à adição de cal.

Tendo definido os percentuais de cal, por meio da verificação do pH de estabilização, e conseqüentemente, as adições a se fazer, iniciou-se a caracterização mecânica. Foi realizado o ensaio de compactação, com intuito de definir as umidades ótima e densidades seca máximas, para em seguida iniciar a moldagem dos corpos-de-prova e realizar o ensaio de compressão simples.

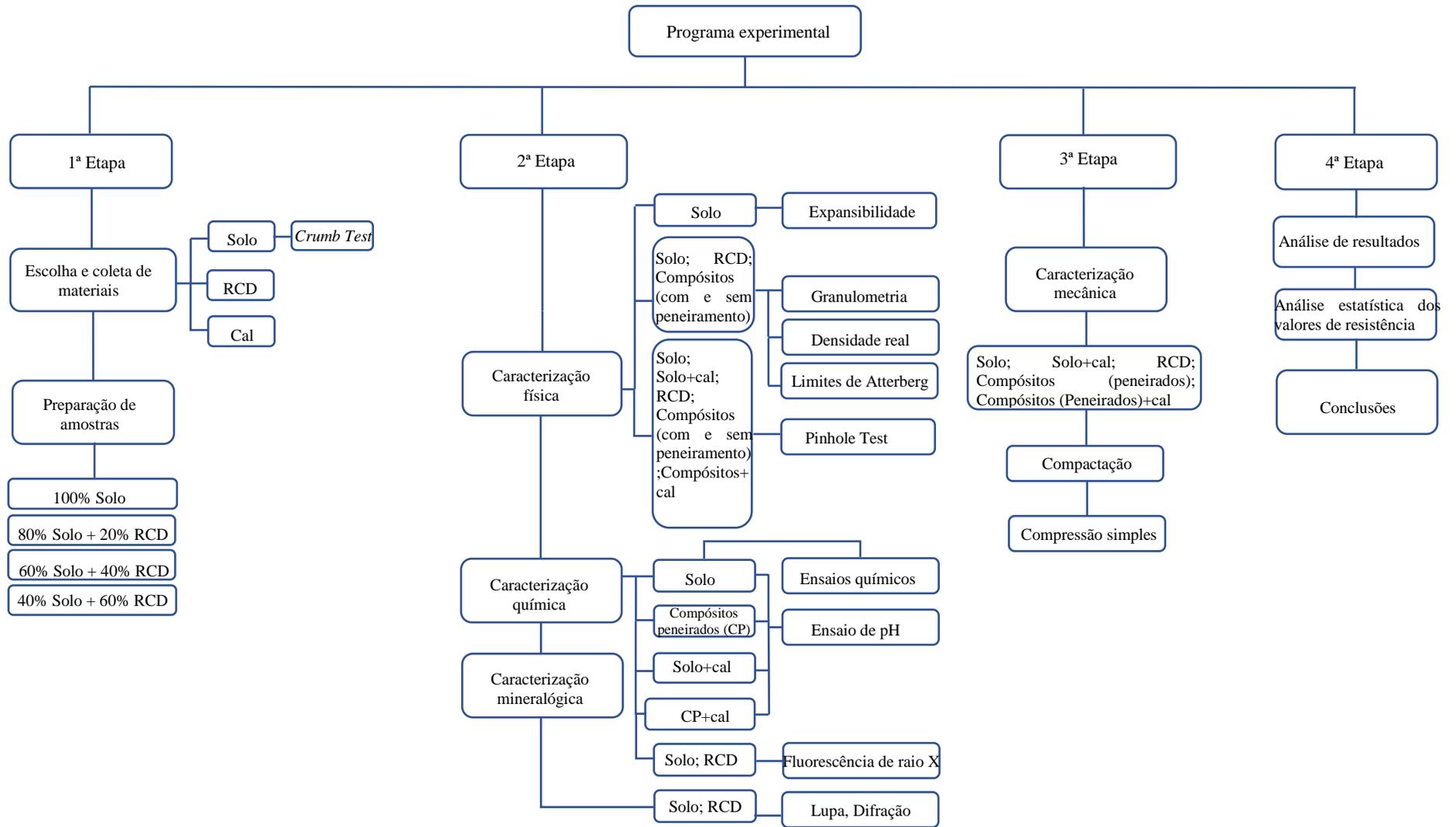
Na quarta etapa são analisados todos os resultados dos ensaios executados, sendo possível verificar como os teores de RCD e cal se comportam no solo, e a influência que apresentam na resistência à compressão simples (RCS) do compósito e na dispersividade. Nesta última fase, faz-se ainda a análise estatística dos valores de RCS obtidos e a análise de componentes principais (ACP). A quantidade e os tipos de ensaios realizados estão apresentados na Tabela 6 e os materiais utilizados em cada ensaio são mostrados no fluxograma da Figura 11.

Tabela 6 - Quantidade de ensaios realizados e materiais utilizados

Ensaio	Quantidade realizada	Materiais analisados	Laboratório
Crumb Test	36	Solo	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Granulometria/Ensaio SCS	24	Solo; RCD; Compósitos (com e sem peneiramento) - (sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Densidade real	16	Solo; RCD; Compósitos (com e sem peneiramento) - (sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Limite de liquidez	8	Solo; RCD; Compósitos (com e sem peneiramento) - (sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Limite de plasticidade	8	Solo; RCD; Compósitos (com e sem peneiramento) - (sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Pinhole Test	60	Solo (com e sem cal); RCD; Compósitos peneirados (com e sem cal); Compósitos não peneirados (sem cal)	Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) – Universidade Federal de Pernambuco
Expansibilidade	1	Solo	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Ensaio químico	2	Solo	Agrolab – Análises Ambientais
Ensaio de pH	24	Solo (com e sem cal); RCD; Compósitos peneirados (com e sem cal)	Laboratório de Combustíveis (POLICOM) – Universidade de Pernambuco
Fluorescência de raio X	2	Solo; RCD	LAGESE – Universidade Federal de Pernambuco
Análise com lupa binocular	2	Solo; RCD	Departamento de Geologia – Universidade Federal de Pernambuco
Difração de raio X	2	Solo; RCD	Laboratório de Ciências do Solo – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Compactação	85	Solo (com e sem cal); RCD; Compósitos peneirados (com e sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Compressão simples	153	Solo (com e sem cal); RCD; Compósitos peneirados (com e sem cal)	Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) – Universidade de Pernambuco
Total	438		

Fonte: A autora

Figura 11 - Fluxograma das etapas do programa experimental



Fonte: A autora

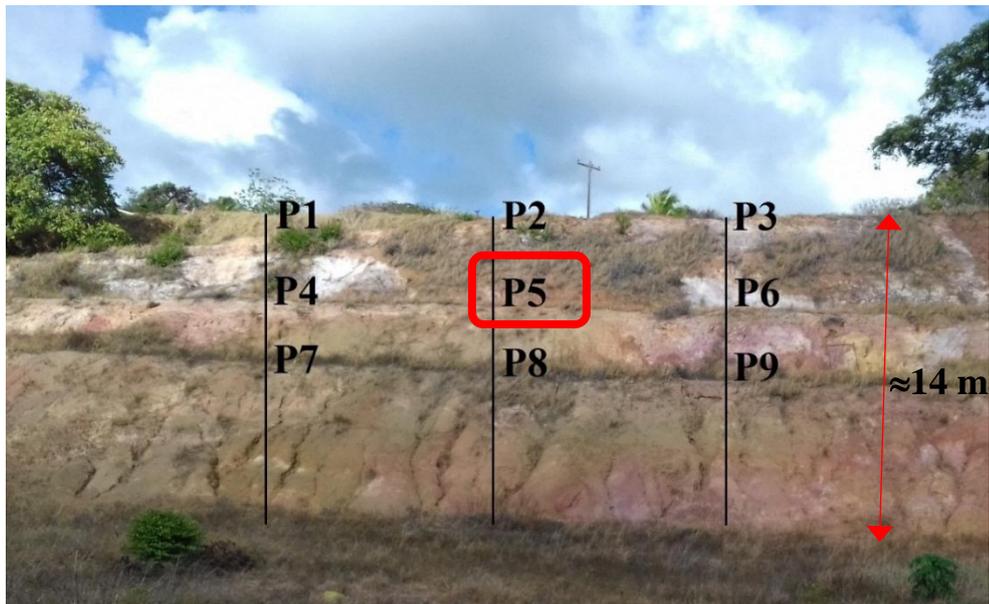
4.1 Primeira etapa do programa experimental

A etapa inicial consistiu na escolha e coleta de materiais e preparação das amostras que foram utilizadas. Esta fase diz respeito à motivação da escolha dos materiais utilizados, sua forma de obtenção, condições das amostras, transporte e armazenamento.

4.1.1 Solo utilizado na pesquisa

O solo de estudo foi retirado da encosta apresentada na Figura 12, cujas características evidenciam erosão local e indícios de dispersividade. Para verificar a composição dos solos da encosta, Bezerra (2018) coletou diferentes amostras de acordo com a variabilidade tátil-visual, totalizando 36 amostras distintas. O autor definiu nos três patamares da encosta, três pontos distintos para retirada de amostras, totalizando nove perfis diferentes.

Figura 12 - Detalhe da encosta de estudo



Fonte: Bezerra (2018) (adaptado)

De posse dessas amostras, nesta pesquisa, foi realizada a análise individual de dispersividade, através do ensaio de *Crumb Test*, para, em seguida, identificar o solo com maior grau de dispersividade. Assim, foram coletados cerca de 200 kg do solo referente à camada superficial do perfil P5, armazenando-o em sacos de rafia. A amostra foi transportada e armazenada no Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco em baldes hermeticamente fechados.

4.1.2 RCD beneficiado

Os resíduos de construção e demolição (RCD) foram coletados em uma usina de beneficiamento, localizada no município de Camaragibe/PE. Essa usina recebe os resíduos provenientes de construções, realiza a segregação de materiais contaminantes que poderiam reduzir a qualidade do produto final e executam o beneficiamento do material. O processo de beneficiamento é utilizado para a produção de agregados por meio de britagem para redução de suas dimensões e posterior peneiramento, sendo segregados em diferentes granulometrias e composições, podendo ser composto por materiais cimentícios, cerâmicos e solo de escavação.

O agregado coletado se refere a granulometria referente a uma areia grossa, com diâmetro das partículas inferiores a 4,8 mm, sendo constituído por concreto, argamassa e cerâmica, e portanto, um material misto. Foram coletados aproximadamente 200 kg de resíduo reciclado, sendo armazenado em sacos de rafia e transportado também para Laboratório Avançado de Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica de Pernambuco, onde foi transferido para recipientes hermeticamente fechados.

4.1.3 Cal utilizada nas misturas

A cal foi escolhida em função da qualidade e grau de pureza aliados a facilidade de obtenção, pois a mesma foi objeto de pesquisa de Ferreira *et al.* (2017), sendo uma cal hidratada CH-I (Figura 13).

Figura 13 - Cal hidratada CH-I utilizada na pesquisa



Fonte: A autora

O material foi ensaiado conforme as normas NBR 7175 (ABNT, 2003a), NBR 9290 (ABNT, 1996a), NBR 9289 (ABNT, 1998a) e NBR 6473 (ABNT, 2003a), estando dentro dos padrões químicos e físicos exigidos para uma cal de ótima qualidade (Tabela 7).

Tabela 7 - Resultados das análises químicas e físicas na cal

Determinações	Unidade	Valor
Umidade	%	1,31
Perda ao fogo	%	24,23
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	%	0,22
Óxido de cálcio total (CaOT)	%	66,93
Óxido de cálcio disponível (CaOD)	%	58,49
Anidrido Carbônico (CO ₂)	%	4,09
Massa específica	g/ml	0,45
Finura Peneira 30 – 0,600 mm	%	0,10
Peneira 200 - 0,075 mm	%	0,13
Retenção de água	%	87,00

Fonte: Ferreira *et al.* (2017) (adaptado)

4.1.4 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a), a qual prescreve o método de preparação para os ensaios de caracterização, como por exemplo a compactação, densidade real dos grãos, limites de consistência (liquidez e plasticidade) e a granulometria. Os percentuais de mistura escolhidos tiveram como base a literatura de outras pesquisas, e, levou-se em consideração também as características granulométricas dos materiais envolvidos, conforme sugere Martins (2016).

Para escolher a técnica de mistura adotada foi necessário fazer a análise granulométrica do solo e do RCD. Com essa análise, verificou-se uma distribuição muito semelhante do tamanho das partículas, tratando-se de materiais extremamente arenosos. Assim, buscando evitar a presença em excesso de partículas de mesma dimensão, optou-se por utilizar apenas frações dos dois materiais para avaliação da resistência à compressão simples.

Dessa forma, utilizou-se frações delimitadas pela peneira de nº 50 (300 µm). Os compósitos peneirados foram formados com a fração de solo, oriundo do P5, superior a 300 µm, enquanto

que o RCD utilizado diz respeito a fração inferior a 300 μm , ou seja, passante na peneira (Figura 14). Entretanto, para verificar se a retirada de parte do solo provoca alterações na dispersividade, e comparar com os resultados obtidos dos compósitos, foram avaliados ainda compósitos de solo e RCD no seu estado natural, ou seja, sem peneiramento.

Figura 14 - Compósitos de solo com substituição de 20%, 40% e 60% de RCD



Fonte: A autora

Todos os compósitos foram feitos com substituição, e os percentuais utilizados foram escolhidos com base nos resultados obtidos por Leite *et al.* (2016) e Martins, Fernandes e Campos (2016), sendo selecionados aqueles que apresentaram melhores resultados para a resistência a compressão simples. A substituição, em percentuais de peso de solo, foi feita tanto para os compósitos peneirados (A, B e C), quanto para os não peneirados (D, E e F), de acordo com as seguintes composições: 100% de solo; 80% de solo e 20% de RCD; 60% de solo e 40% de RCD, 40% solo e 60% de RCD (Tabela 8).

Tabela 8 – Percentuais utilizados na preparação das amostras dos compósitos

Nomenclatura	Material	Percentuais utilizados
A	Compósito 1	80% Solo + 20% RCD (peneirado na nº 50)
B	Compósito 2	60% Solo + 40% RCD (peneirado na nº 50)
C	Compósito 3	40% Solo + 60% RCD (peneirado na nº 50)
D	Compósito 4	80% Solo + 20% RCD
E	Compósito 5	60% Solo + 40% RCD
F	Compósito 6	40% Solo + 60% RCD

Fonte: A autora

A cal hidratada utilizada nas amostras foi aplicada por meio de adição, em percentual de massa seca, sendo sua aplicação feita apenas nos compósitos peneirados e no solo. Para facilitar a compreensão, foram atribuídas nomenclaturas aos compósitos e solo adicionados de cal, estando apresentadas na Tabela 9. No total, foram analisados 20 tipos distintos de materiais.

Tabela 9 - Nomenclatura dos compósitos peneirados e solo, adicionados de cal hidratada

Percentual de adição de cal	Material			
	Solo	Compósito 1	Compósito 2	Compósito 3
0%	Solo	A	B	C
3%	S3	A3	B3	C3
5%	S5	A5	B5	C5
7%	S7	A7	B7	C7

Fonte: A autora

4.2 Segunda etapa do programa experimental

A segunda etapa, refere-se aos ensaios de caracterização física do solo, do agregado e dos compósitos, sem adição de cal hidratada. Nos ensaios de caracterização química, identificou-se os componentes do solo, e para os compósitos peneirados, com e sem cal, foi feita a análise do pH. Para a preparação dos ensaios físicos, utilizou-se a NBR 6457 (ABNT, 2016a), que prescreve o método de preparação de amostras e a determinação do seus teores de umidade.

4.2.1 Caracterização física

Com o intuito de descrever as características dos materiais utilizados foi feita a caracterização física do solo e do RCD, separadamente, e dos compósitos com e sem peneiramento, sem adição de cal. Os ensaios realizados com os componentes descritos foram: granulometria, densidade real, limites de Atterberg e *Pinhole Test*. No caso específico do solo, realizou-se ainda o ensaio de *Crumb Test* e de expansibilidade. O *Pinhole Test*, entretanto, foi executado também para os materiais adicionados de cal.

4.2.1.1 Crumb test

O ensaio do torrão, como também se denomina o *crumb test*, indica a susceptibilidade de uma amostra de solo apresentar comportamento dispersivo. O ensaio deve ser utilizado de forma preliminar, sendo este uma investigação qualitativa do solo para posteriormente se fazer uma

investigação do potencial de dispersividade. A NBR 13601 (ABNT, 1996b) descreve o método de ensaio do torrão por meio de observações visuais de torrões do solo imersos em água destilada, classificando-os como dispersivos ou não-dispersivos.

Para conhecimento preliminar e definição da escolha do solo, foram avaliados os comportamentos das diferentes camadas de solo dos perfis numerados de 1 a 9, sendo o número de camadas apresentados na Tabela 10. O solo coletado foi acondicionado conservando sua umidade natural, sendo retirados pequenos torrões, em seu estado natural, para realização do ensaio. Este, foi adaptado ao procedimento de ensaio apresentado pela NBR 13601 (ABNT, 1996b).

Tabela 10 - Número de camadas por perfil da encosta

Perfil	Número de camadas	Profundidade (m)
1	3	5
2	7	5
3	4	5
4	3	5
5	7	5
6	2	5
7	6	5
8	2	5
9	2	5

Fonte: A autora

Foram retirados de cada camada três torrões, de diâmetro variando entre 6 mm e 10 mm com formato ligeiramente arredondado (Figura 15). Estes foram mergulhados em béqueres contendo 150 ml de água destilada, permanecendo por uma hora, sendo observado o comportamento que cada solo apresentou, verificando se o solo possui caráter dispersivo.

Figura 15 - Torrões retirados das amostras coletadas



Fonte: A autora

4.2.1.2 Granulometria

Para determinação da composição granulométrica do solo foi utilizada a NBR 7181 (ABNT, 2017c). A identificação das frações de argila, silte, areia e pedregulho foi feita pela NBR 6502 (ABNT, 1995). Para cada amostra foi feita a sedimentação com defloculante e com dispersor, com defloculante e sem dispersor, e sem defloculante e sem dispersor, seguindo as recomendações da NBR 13602 (ABNT, 1996c).

4.2.1.2.1 Ensaio sedimentométrico comparativo (SCS)

O procedimento do ensaio consistiu na aplicação das diretrizes da NBR 13602 (ABNT, 1996c), sendo semelhante ao apresentado pela NBR 7181 (ABNT, 2017c), apresentando diferenças por não utilizar agitação mecânica e dispersão na solução de solo e água. A execução foi feita apenas para o solo, RCD, e compósitos.

Já que a NBR 13602 (ABNT, 1996c) não apresenta intervalos de valores os quais possibilitam a classificação do grau de dispersão do solo, utilizou-se critérios oriundos de outras normas e da literatura. Para isso, aplicou-se o parâmetro do percentual de dispersão (PD) proposto pelo Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP (Companhia Energética de São Paulo), a norma MSL 12 (CESP, 1983), a qual determina que solos são dispersivos para $PD (\%) > 20\%$.

O grau de dispersão foi verificado ainda com base em Rajesh e Marimuthu (2015), os quais classificam a dispersão percentual com valores distintos da MSL12 (CESP, 1983), considerando a possibilidade do solo ser não-dispersivo a altamente dispersivo, a depender do valor calculado, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Grau de dispersão pelo teste do densímetro duplo

Dispersão Percentual (%)	Grau de dispersão
<15	Não dispersiva
15 a 30	Ligeiramente dispersiva
30 a 50	Moderadamente Dispersivo
> 50	Altamente Dispersivo

Fonte: Rajesh e Marimuthu (2015)

4.2.1.3 Densidade real e Limites de Atterberg

As massas específicas do solo, resíduo, e seus diferentes compósitos foram obtidos de acordo com a execução de ensaio proposta pela NBR 6508 (ABNT, 1984), conforme mostrado na Figura 16. Para os limites, foram obtidos os valores dos limites de liquidez e de plasticidade tanto para o solo e RCD, quanto para os compósitos. O primeiro está prescrito na NBR 6459 (ABNT, 2017a), enquanto que o segundo está na norma NBR 7180 (ABNT, 2017b).

Figura 16 - Execução de ensaio de massa específica



Fonte: A autora

4.2.1.4 Pinhole Test

Por meio do ensaio do furo de agulha, normatizado pela NBR 14114 (ABNT, 1998b), de metodologia proposta por Sherard, Dunningan e Decker (1976), é possível obter o grau de dispersividade em seis classificações distintas a depender da aparência do efluente, da medição das vazões e das dimensões finais do furo vistos no equipamento do ensaio.

O ensaio de *Pinhole Test* foi feito no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco (LSI – UFPE), para verificar o comportamento dispersivo dos materiais, seguindo as recomendações da NBR 14114 (ABNT, 1998b). Para sua realização, foram moldados três corpos de prova de cada traço, com altura igual a 38 mm (Figura 17), obtidos por meio de compactação. Os materiais utilizados para a moldagem foram mantidos em câmara úmida por 24 horas, antes da execução do ensaio.

Figura 17 - Moldagem de corpo-de-prova para realização do ensaio do furo de agulha



Fonte: A autora

No ensaio, a percolação de água teve início na carga hidráulica de 50 mm por 5 minutos, sendo a carga aumentada para, 180 mm, 380 mm e 1020 mm, com o mesmo intervalo de tempo. Durante o ensaio, a água percolante foi coletada e teve seu aspecto observado, sendo registrado ainda o volume passante por minuto. Optou-se ainda por fazer a execução no sentido inverso, ou seja, com descarga, pois, neste caso, ao observar um aumento da vazão, poderia se inferir um aumento no tamanho do furo, mostrando a presença de um processo erosivo (LAFAYETTE, 2006).

A classificação quanto a dispersividade seguiu as recomendações da norma, segundo a qual a nomenclatura é feita por siglas, sendo elas: ND1, ND2, ND3, ND4, D2 e D1. O grau de dispersividade aumenta do ND1, considerado não dispersivo a D1, sendo este altamente dispersivo.

4.2.1.5 Ensaio de expansibilidade

A característica erodível de um solo pode ser um dos indicativos do comportamento dispersivo de um determinado solo. Segundo Lafayette (2006), a expansibilidade, junto à distribuição granulométrica, é um fator que pode representar a erodibilidade, porém para solos tropicais pode não ser considerado um índice determinante. Isto, pois, a correlação da expansibilidade com o caráter erodível de um solo está diretamente ligada à aspectos regionais, sendo proposta pelo LNEC (Laboratório de Engenharia Civil de Portugal), em estudos com solos de regiões temperadas.

No entanto, por ser um estudo presente em diversas pesquisas que tratam de solos erodíveis, optou-se por aplicar ao solo e verificar se o resultado é condizente com a característica do solo *in situ*. Tendo em vista tal aspecto, foi realizado o ensaio de expansibilidade para a amostra de solo, conforme a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT 160/2012. Para Lafayette (2006), solos com comportamento de regular a bom frente à erosão apresentam expansibilidade (ε) $\leq 11\%$.

A norma prescreve o método de ensaio de expansibilidade para solos, passando-os na peneira nº 40 em condições definidas de compactação, para medida de variação de volume com absorção de água por capilaridade, por meio de uma placa porosa posicionada em um recipiente de vidro (Figura 18 a). A compactação deve ser feita com um soquete (Figura 18 b), em duas camadas de 50 golpes, a uma compressão por segundo, para que após a compactação seja excedida a borda do molde e feito o nivelamento (Figura 18 c). Nesta superfície é colocada uma placa de acrílico para acomodar o deflectômetro.

Figura 18 - Equipamento utilizado em recipiente de vidro (a); compactação do solo com soquete padronizado (b); nivelamento da amostra (c)



Fonte: A autora

É aconselhável que as leituras sejam feitas a cada 15 minutos na primeira hora, a cada hora no primeiro dia, ou até que duas leituras com intervalo de 2h deem o mesmo valor ou valores decrescentes. O resultado da expansibilidade (ε) é expresso em percentual, de acordo com a Equação 1:

$$\varepsilon = \left(\frac{L1 - L0}{15} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

L0 = Leitura inicial do extensômetro, em mm;

L1 = Leitura final do extensômetro, em mm.

4.2.2 Caracterização química

Foram feitas análises químicas a fim de identificar o teor de sais dissolvidos na água intersticial do solo, o complexo sortivo e a capacidade de troca catiônica, sendo analisados os teores de sódio, cálcio, potássio e magnésio. A análise química do solo foi realizada no Laboratório da Agrolab – Análises Ambientais LTDA/PE, com método de análise executado de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

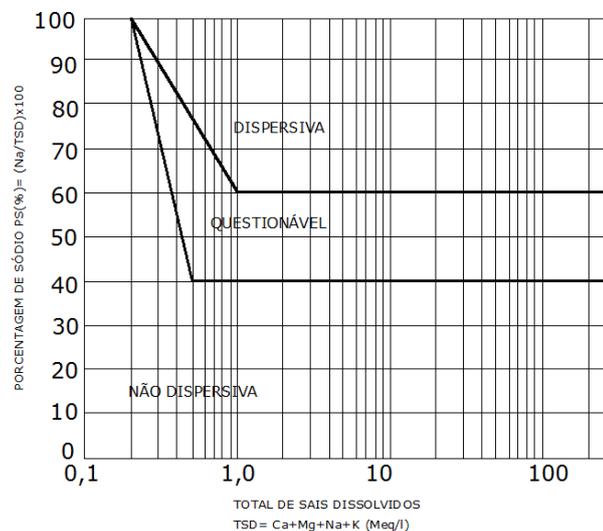
Com os resultados foram calculados os seguintes parâmetros (Tabela 12): total de sais dissolvidos (TSD), porcentagem de sódio presente (PS) e razão de absorção de sódio (RAS ou SAR). Esses valores foram aplicados no ábaco (Figura 19) proposto por Sherard, Dunningan e Decker (1976), a partir do qual é possível determinar a dispersividade do solo em três zonas: a dispersiva, a não-dispersiva e a questionável. Os solos enquadrados na classificação intermediária devem ser analisados em outros ensaios, a fim de obter uma conclusão mais específica.

Tabela 12 - Cálculo de parâmetros para avaliação da dispersividade de solos argilosos

Parâmetro	Cálculo
TSD	$TSD = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}$
PS (%)	$PS (\%) = \left(\frac{Na^{+}}{TSD} \right) \times 100$
RAS	$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2} \right)}}$

Fonte: Villalba (2015) (adaptado)

Figura 19 - Ábaco para avaliação da dispersividade baseado na química de água intersticial



Fonte: Sherard, Dunningan e Decker (1976)

Com intuito de caracterizar os demais elementos do solo, realizou-se o ensaio de fluorescência de raios-X, o qual também foi aplicado ao RCD. As amostras foram passadas na peneira 0,075 mm e encaminhadas para o Laboratório NEG- LABISE do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. As amostras foram secas em estufa a 110°C e uma porção de amostra seca foi levada a uma mufla, a 1000°C, por 2 horas, para determinação de perda ao fogo.

Uma outra porção de amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semiquantitativa foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo.

4.2.2.1 Ensaio de pH

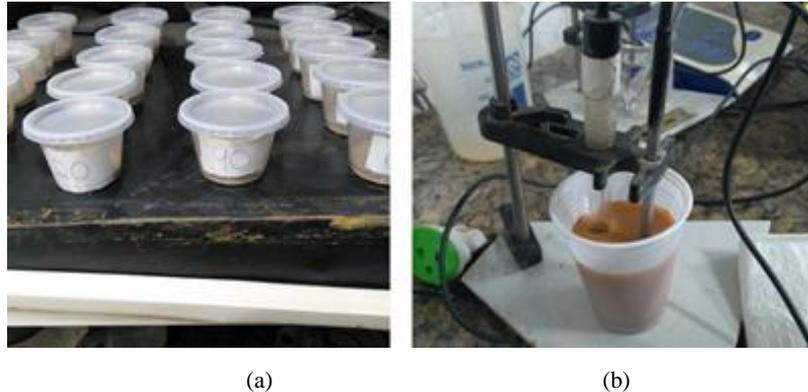
O estudo do pH do solo é importante, pois através dele é possível conhecer os teores de adições necessárias para sua estabilização. Nesta pesquisa, o procedimento adotado foi o proposto por Eades e Grim (1966), sendo feita uma adaptação quanto aos percentuais de cal a serem testados devido a resultados positivos de adição desse material para estabilização de solos dispersivos (SAMANIEGO, 2015).

Buscou-se por meio do ensaio um valor de pH correspondente a 12,42, pois tal valor indica a estabilização da mistura em solos expansivos, ou valores para os quais seja identificado o comportamento máximo constante do pH (SAMANIEGO, 2015) acompanhado do aumento percentual de cal hidratada. Assim, foram definidos os teores de utilização de cal para misturas com solo e com os compósitos A, B e C.

As etapas do ensaio foram descritas por Corrêa (2008), nas quais as amostras de solo devem ser secas ao ar, passadas na peneira nº 40 e acondicionadas em recipientes plásticos tampados (Figura 20 a), de modo que o peso em solo seco seja de 20 g. Adicionou-se os percentuais de cal ao solo seco junto a 100 ml de água destilada às misturas e durante uma hora os recipientes foram agitados a cada dez minutos, para homogeneizar a amostra.

Passado o tempo se determinou, por meio de um potenciômetro, o pH das misturas (Figura 20 b e Figura 20 c). Dessa forma, foram estudados os valores de pH nas concentrações de 0%, 1%, 3%, 5%, 7% e 9%, para o solo puro e para as misturas com RCD.

Figura 20 - Amostras preparadas para ensaio de pH (a); aferição de pH da amostra (b)



Fonte: A autora

4.2.3 Caracterização mineralógica

O conhecimento da composição mineralógica dos sedimentos de um dado local é fundamental para um melhor conhecimento das suas características (GARCIA, 2015), sendo a fração argilosa um fator intrínseco do solo que influencia o potencial de alteração dos seus atributos físicos (CAMARGO, 2009). Por meio da mineralogia, a qual impacta nas propriedades físicas, químicas, tamanho e forma dos grãos do solo, é possível compreender o comportamento do solo no que diz respeito à plasticidade, expansibilidade e resistência do material (MACEDO, 2013).

A análise mineralógica da fração de areia do solo e do RCD no Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESE) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), utilizando como equipamento uma lupa binocular de marca ZEISS, modelo STEMI 508, com imagem aumentada em 50 vezes. As amostras foram lavadas na peneira 0,075 mm, secas em estufa a 100°C e armazenadas em sacos plásticos.

Quanto a fração mais fina dos materiais, identificou-se os componentes por meio de difratometria de raio X, realizado no Laboratório de Ciências do solo do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, porém a interpretação foi realizada no Departamento de Minas da UFPE. As amostras foram analisadas sob a forma de pó natural

não orientado, com difratômetro da marca Shimadzu XRD-6000 com radiação Cu-K α , velocidade de análise de 2,0 graus/min e intervalo 2 θ de 5 a 70 graus.

4.3 Terceira etapa do programa experimental

A terceira etapa de realização de ensaios consiste na verificação dos aspectos de umidade ótima, densidade seca máxima e da resistência à compressão simples. Os ensaios correspondentes a esses parâmetros foram realizados para todos os materiais, exceto para os compósitos sem peneiramento (D, E e F).

4.3.1 Caracterização mecânica

Para entender como a modificação granulométrica e a adição química se comportam quando são aplicados ao solo de estudo, foram realizados os ensaios de compactação e de compressão simples. Assim, foi possível obter os valores, de umidade ótima e densidade seca máxima, além dos valores de resistência à compressão. Os procedimentos de ensaio seguiram as recomendações das normas brasileiras vigentes.

4.3.1.1 Compactação

O ensaio de compactação (Figura 21) foi realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016b), a qual objetiva conhecer os valores da umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima. Assim é possível saber com qual quantidade de água se obtém o melhor arranjo das partículas, proporcionando uma maior resistência.

Figura 21 - Execução do ensaio de compactação



Fonte: A autora

O ensaio foi realizado com utilização de energia Proctor Normal com cilindro pequeno, pois conforme a norma, ela deve ser utilizada quando a amostra passa integralmente pela peneira de 4,8 mm de abertura da malha. As amostras, tanto do solo quanto dos compósitos, foram previamente secas ao ar e utilizadas para a compactação com reuso de material. Os corpos-de-prova foram ensaiados para o solo, RCD, compósitos sem peneiramento e para os materiais adicionados de cal. A sequência de preparação dos corpos-de-prova se deu com a pesagem dos materiais, a sua mistura e moldagem, sendo compactados no total 85 corpos-de-prova.

4.3.1.2 *Compressão simples*

O ensaio para determinação da resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a NBR 12770 (ABNT, 1992). Foram moldados três corpos-de-prova para cada idade de rompimento, as quais são referentes a 7, 28 e 120 dias, sendo esta última estabelecida para, no prazo da pesquisa, verificar a resistência com maior tempo de cura, totalizando 153 amostras moldadas.

Cada corpo-de-prova foi compactado de forma estática na prensa manual de CBR (Figura 22 a) da marca SoloTest, em três camadas (Figura 22 b), entre as quais foi realizada uma leve escarificação, de modo que se proporcione maior interação entre elas. O ensaio foi executado para o solo, RCD, compósitos peneirados e suas misturas com cal, sendo os corpos-de prova confeccionados em moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

Figura 22 - Moldagem em prensa manual (a); Controle tecnológico do corpo-de-prova (b)



Fonte: A autora

As amostras compactadas foram mantidas em câmara úmida para conservar a umidade de compactação durante o tempo de cura (Figura 23). Para controle das condições de compactação,

ou seja, dos valores de densidade seca e umidade ótima, foram estabelecidos intervalos de valores os quais dizem respeito aos critérios de aceitação de uso para rompimento (Tabela 13). O rompimento dos corpos-de-prova foi realizado na mesma prensa da moldagem, com aplicação de carga 500 Kgf, a uma velocidade de deformação de 0,04 mm/segundo.

Figura 23 - Amostras compactadas e mantidas em câmara úmida



Fonte: A autora

Tabela 13 - Critérios de aceitação dos corpos-de-prova moldados

Parâmetro	Critérios
Grau de compactação (GC)	100% \pm 3%
Umidade (%)	Valor \pm 3%
Dimensões (mm)	Diâmetro 50 \pm 0,5; Altura 100 \pm 1

Fonte: Macedo (2013) (adaptado)

Foi calculado ainda o módulo de elasticidade secante (E_{50}), que se refere à reta que parte da origem até a metade da tensão de ruptura, para análise ao longo do tempo e dos efeitos que cada material provoca. O módulo de elasticidade é considerado por Attux (2017) como “representativo da rigidez ou resistência do material frente a uma deformação elástica”. Para ele, quanto maior o módulo, mais rígido é o material, e menor a deformação de uma dada tensão.

4.4. Quarta etapa do programa experimental

Em decorrência da quantidade de variáveis que interferem no resultado da resistência à compressão simples, se faz necessário analisar estatisticamente a variabilidade de valores e a interferência que cada material provoca. Dessa forma, verificou-se a representatividade dos

valores individuais de RCS em relação à média por meio do critério de Chauvenet, e, analisou-se, por meio da análise de componentes principais (ACP), quais as variáveis influenciam, com maior significância estatística, os resultados de RCS.

4.4.1 Análise estatística dos valores de RCS (Critério de Chauvenet)

A medição de uma determinada grandeza, quando feita n vezes, pode apresentar desvios não aceitáveis em relação ao valor médio obtido e muito distante do desvio padrão das medições, tendo esse fator diversas origens, como erros grosseiros, falhas momentâneas do equipamento ou variação estatística excepcional (SILVA, 2014; FAGUNDES, 2011).

Para verificar se os resultados individuais de resistência à compressão simples estão representados pela média, analisou-se os valores de RCS pelo Critério de Chauvenet, conforme utilizado por Araújo, Guimarães e Geyer (2016), no estudo da resistência à compressão de concreto. Esse método permite eliminar os valores duvidosos com base na probabilidade que um valor medido esteja desviado da média esperada, podendo ser rejeitado se a probabilidade m de obter o desvio em relação à média é menor que $1/(2n)$, onde n é o número de medições.

O critério se baseia na razão $\Delta R = (x_i - \bar{x})/\sigma$, calculada entre do desvio absoluto dos valores individuais em relação à média ($x_i - \bar{x}$) e do desvio padrão do conjunto de dados (σ), e na comparação desse valor com o ΔR_0 , o qual varia em função da quantidade de amostras utilizadas na obtenção dos dados. Se o valor calculado for superior ao de referência ele deve ser descartado, caso contrário, ele está representado pela média. Os valores de ΔR_0 estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido

Número de leituras	ΔR_0
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Fonte: FEM-UNICAMP (2017) (adaptado)

4.4.2 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica estatística muito utilizada na avaliação de dados, utilizando o estudo simultâneo de diferentes variáveis que influenciam determinado objeto sob investigação (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016). A ACP se baseia na transformação de um conjunto de variáveis originais em outras variáveis de mesma dimensão, chamadas de componentes principais (CP).

O principal objetivo da ACP é descrever a estrutura da variância e da covariância de uma nuvem de pontos, relacionados pelas novas variáveis, ou seja, pelas componentes principais. Segundo Carvalho *et al.* (2017), com o número de variáveis originais pode se obter a mesma quantidade de componentes principais. Para se obter as CP, considera-se uma matriz de covariância de vetores, os quais são, em geral, transformados.

Uma transformação é a padronização das variáveis do vetor pelas suas médias e desvios padrões, para assim calcular variáveis centradas em zero e com variâncias iguais a um. De posse das componentes principais, seus valores numéricos (escores) podem ser determinados para cada elemento da amostra (CARVALHO *et al.*, 2017). Os escores são calculados conforme a Equação 2, apresentada por Lafayette (2006):

$$E = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_i} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E = Escore;

X_i = Valor individual da variável;

\bar{X} = Média dos valores da variável;

σ_i = Desvio padrão da variável.

O cálculo dos escores foi realizado para as variáveis: percentual de solo, percentual de RCD, percentual de cal hidratada, tempo de cura e resistência à compressão, de modo a ponderar e atribuir pesos aos seus valores. Os resultados foram aplicados no software Statistica 10.0 para avaliação da influência das variáveis na resistência à compressão simples.

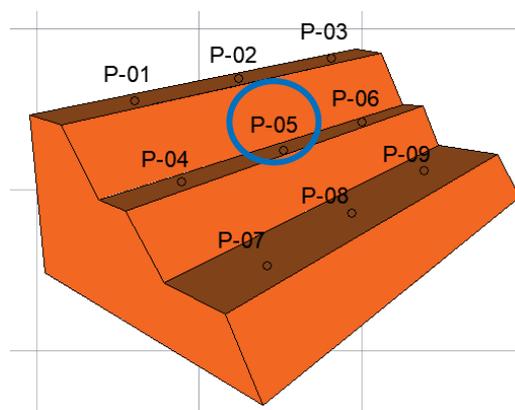
5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados em laboratório e suas respectivas análises. São apresentados os valores obtidos dos ensaios de erodibilidade e caracterizações física, química, mineralógica e mecânica dos materiais estudados, sendo possível fazer um diagnóstico mais preciso a respeito do comportamento mecânico dos compósitos.

5.1. Crumb test

O ensaio foi executado em todas as camadas do solo da encosta, para indicar qual a camada mais dispersiva. Dentre as camadas e perfis distintos, as que apresentaram comportamento dispersivo foi a terceira camada do perfil 2 e primeira camada do perfil 5, não havendo indícios de dispersividade nos demais solos analisados.

Figura 24 – Identificação dos perfis da encosta



Fonte: Bezerra (2018) (adaptado)

No entanto, o maior comportamento dispersivo diz respeito a primeira camada do perfil de número 5. A amostra utilizada no decorrer do ensaio apresentou a formação de colóides em suspensão e espalhamento do torrão no fundo do béquer, provocando na água um turvamento que indica a presença de solo dispersivo. Por isso, o solo pertencente ao ponto P5 foi o definido para o desenvolvimento dessa pesquisa.

De acordo com as faixas de dispersividade determinadas pela NBR 13601 (ABNT, 1996b) pela aparência da água, classificou-se o solo com grau de dispersividade variando de 3 a 4, indicando

que é possível que o solo seja dispersivo (Figura 25). Porém, para ratificar esta classificação, comparou-se o resultado com os demais ensaios de dispersividade.

Figura 25 - *Crumb test* da primeira camada do perfil 5

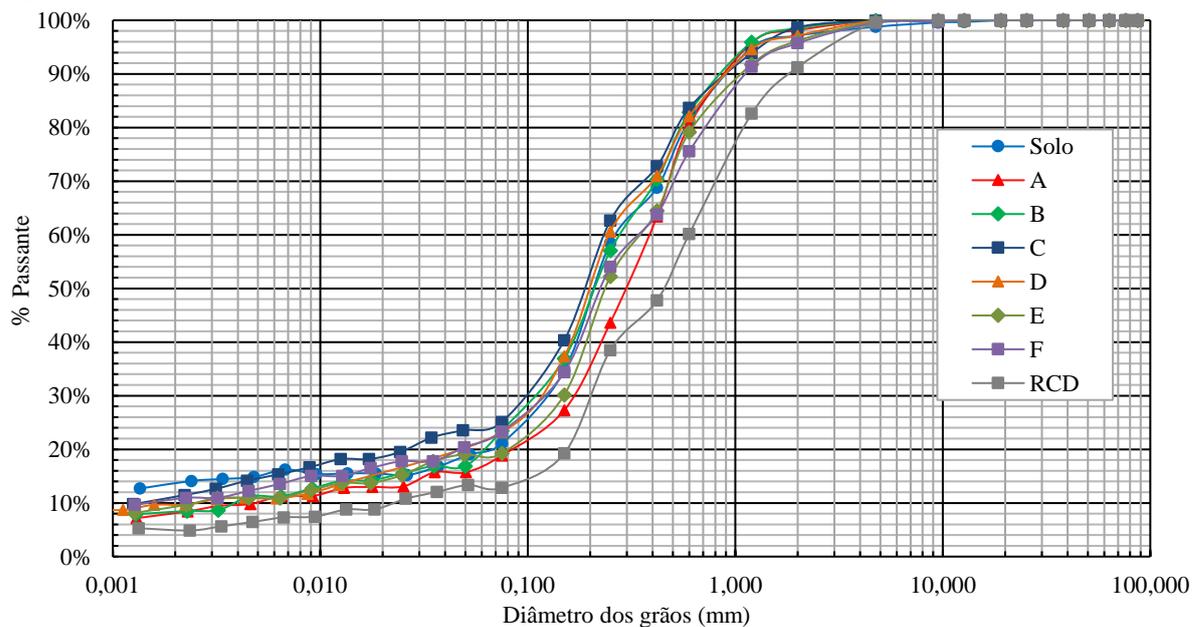


Fonte: A autora

5.2 Granulometria

Foi realizada a análise granulométrica do solo, RCD e compósitos, obtendo-se assim as curvas granulométricas, as quais estão apresentadas na Figura 26. Os percentuais de cada fração granulométrica relativas as amostras estão descritas na Tabela 15, bem como as respectivas relações silte/argila.

Figura 26 - Curva granulométrica do solo, RCD e compósitos



Fonte: A autora

Tabela 15 – Granulometria das amostras de solo, RCD e compósitos

Material	Frações				Relação silte/argila
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	
Solo	14%	5%	78%	3%	0,41
RCD	5%	9%	77%	9%	1,76
A	8%	8%	82%	2%	1,03
B	9%	10%	81%	1%	1,11
C	11%	13%	75%	1%	1,19
D	13%	9%	75%	3%	0,71
E	9%	11%	76%	4%	1,13
F	11%	10%	75%	4%	0,99

Fonte: A autora

Em todos os materiais analisados granulometricamente, a porção de areia é a fração predominante, representando de 75% a 82% da composição total dos materiais. No que diz respeito aos compósitos peneirados, verifica-se, no entanto, que à medida que se substitui o solo por RCD, a fração fina é percentualmente aumentada, sendo compatível com a quantidade de material fino substituído.

Nos compósitos sem peneiramento, a fração de areia é semelhante em relação ao solo, porém, a quantidade de silte foi superior nos compósitos D, E e F. Observa-se ainda que o percentual silte-argila aumentou com a substituição de RCD nos compósitos, exceto no compósito A. Contudo, para os materiais estudados, no que se refere à faixa granulométrica de argila do solo, nenhum dos materiais apresentou valor superior ao do solo.

A respeito da relação silte/argila, o solo possui valor de 0,41, sendo a menor relação dentre os materiais analisados, seguido pelo RCD, compósitos sem e com peneiramento. Segundo Portela *et al.* (2014) a relação silte/argila é um forte indicador de intemperismo, sendo a relação tanto menor quanto maior for o grau de intemperismo do solo. Dessa forma, evidencia-se que nos compósitos se encontra a menor susceptibilidade aos processos erosivos, e no solo, uma maior característica de atuação dos processos erosivos.

Por meio das curvas granulométricas foram calculados os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), e de posse dos seus valores foi feita a correspondente classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM, 1990) e da Transportation Research Board (TRB) (DNIT, 2006). Os resultados estão mostrados na Tabela 16.

De acordo com a classificação SUCS o solo é considerado como SM, nomenclatura que corresponde a uma areia siltosa, bem como para todos os compósitos, isto devido a presença de mais de 12% dos grãos passantes na peneira nº 200. O RCD, por sua vez é classificado como areia bem graduada, pois possui $C_u > 6$ e $1 < C_c < 3$.

Tabela 16 - Valores de C_u , C_c e classificação SUCS e TRB do solo, RCD e compósitos

Material	C_u	C_c	Distribuição	SUCS	TRB
Solo	0	0	-	SM	A-2-4
RCD*	25	2,78	Bem graduado	SW	A-2-4
A	76	15,21	Mal Graduado	SM	A-2-4
B	71	14,04	Mal Graduado	SM	A-2-4
C	230	43,48	Mal Graduado	SM	A-2-4
D	192	44,31	Mal Graduado	SM	A-2-4
E	159	33,25	Mal Graduado	SM	A-2-4
F	188	31,07	Mal Graduado	SM	A-2-4

(*) Utiliza-se a classificação do RCD de forma equivalente a dos solos

Fonte: A autora

Para a TRB (DNIT, 2006) todos os materiais avaliados se encontram na classificação A-2-4, resultado também encontrado por Hammes *et al.* (2017) e Silva (2017) para o mesmo tipo de solo, a qual diz respeito a areias argilosas ou siltosas, estando de acordo com a classificação da NBR 6502 (ABNT, 2005).

Com essa classificação todos os materiais são considerados como de comportamento variando de bom a excelente para aplicação geral como subleito (DNIT, 2006), entretanto essa classificação não considera o aspecto dispersivo do solo. O DNIT aponta ainda que para esta classificação os valores de CBR (California Bearing Ratio) podem estar compreendidos em um intervalo de 25 a 80, em geral, sendo possível inferir que são solos com ampla aplicação para uso em pavimentação (COSTA, 2017; LUCENA, *et al.*, 2017).

Quanto aos coeficientes calculados, observa-se que para o solo não há coeficiente de uniformidade e de curvatura, e que para o RCD o C_u é 25 e o C_c é igual 2,78. Assim, o agregado reciclado é classificado, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2005), como equivalente a um solo não uniforme, no entanto os valores estão dentro dos padrões exigidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004b) para fins de pavimentação.

Por outro lado, os compósitos de solo e RCD foram classificados como mal graduados, de acordo com os padrões da norma NBR 6502 (ABNT, 2005), tendo em vista que os valores de C_u e C_c excedem os limites de uniformidade do solo ($C_u > 15$) e de graduação do solo ($C_c > 3$).

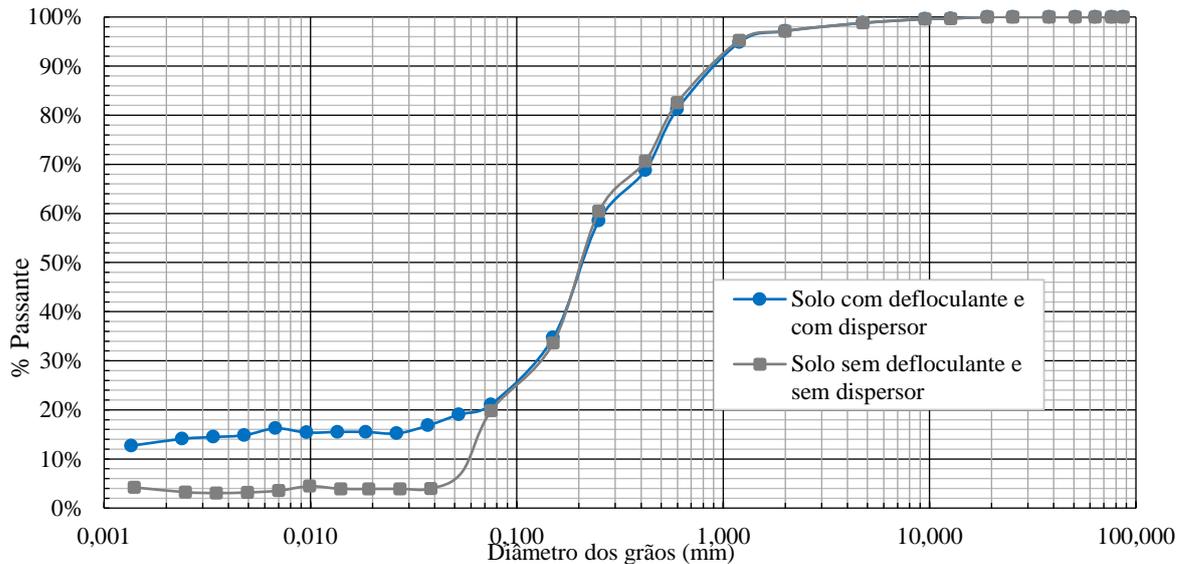
No que se refere ao formato e distribuição granulométrica das amostras avaliadas, por meio das curvas é possível observar que nas amostras de solo e RCD há uma distribuição de partículas, as quais, em sua maioria, estão localizadas na faixa granulométrica compreendida entre as frações de 0,06 mm e 2 mm, correspondendo à areia. Em relação aos compósitos, verifica-se comportamento granulométrico semelhante ao do solo e do RCD, individualmente.

Nos compósitos com e sem peneiramento, nota-se que as curvas granulométricas se encontram entre as do solo e do RCD, assim como obtiveram Silva, Fucale e Ferreira (2017), havendo valores percentuais semelhantes de partículas de areia fina, silte e argila. O comportamento das curvas desses materiais demonstram uma conservação de tendência, quando se compara às curvas dos materiais sem adição, contudo nos compósitos peneirados há um percentual levemente superior da fração arenosa em relação aos não peneirados, devido à maior concentração de areia fina e média, referente à porção substituída.

5.2.1 Ensaio sedimentométrico comparativo (SCS)

Para avaliar a dispersividade do solo, foi feito o ensaio sedimentométrico comparativo, executado pela NBR 7181 (ABNT, 2017c), ou seja com defloculante e com dispersor mecânico, e a pela NBR 13602 (ABNT, 1996c), sem defloculante e sem dispersor. A curva obtida está mostrada na Figura 27. As curvas referentes aos demais materiais estão contidas no Apêndice A.

De acordo com as curvas, a porcentagem das partículas com dimensão inferior a 0,005 mm no ensaio com defloculante, para o solo, foi de aproximadamente 14,84%, enquanto que no solo sem defloculante o resultado é próximo de 3,18%. Dessa forma, a porcentagem de dispersão (PD) é de 21,43%, valor indicativo de uma amostra ligeiramente dispersiva, conforme visto por Rajesh e Marimuthu (2015).

Figura 27 - Curvas granulométricas do solo com e sem defloculante, com e sem agitação mecânica

Fonte: A autora

Ainda sobre a classificação do grau de dispersividade do solo, analisou-se a amostra também pelos padrões da norma MSL12 (CESP, 1983), a qual indica que um valor PD superior a 20% é indicativo de um solo dispersivo. Dessa forma, o solo estudado, por apresentar um valor ligeiramente superior ao estabelecido, também é considerado como dispersivo.

A substituição das frações de solo por RCD nos compósitos A, B e C modificou a característica dispersiva ligada ao solo. Verificou-se que a dispersividade apresentou valor inferior a 20%, indicando que para os compósitos não há evidências de dispersividade (Tabela 17). Tal fato está ligado à retirada dos grãos que provocam o comportamento dispersivo, que é a fração granulométrica referente às argilas.

Tabela 17 - Percentuais de dispersão dos materiais estudados

Material	PD (%)	Classificação
Solo	21,43%	Dispersivo
RCD	7,57%	Não dispersivo
A	14,25%	Não dispersivo
B	12,68%	Não dispersivo
C	4,89%	Não dispersivo
D	15,52%	Ligeiramente dispersivo
E	0,51%	Não dispersivo
F	0,74%	Não dispersivo

Fonte: A autora

Foi verificado em relação aos compósitos não peneirados, que no compósito D, referente a 20% de RCD, a amostra apresentou comportamento ligeiramente dispersivo com base em Rajesh e Marimuthu (2015), entretanto é não dispersiva de acordo com a CESP (1983), demonstrando que a mistura de solo e RCD sem peneiramento, com esse percentual, não elimina o caráter dispersivo do solo. Os compósitos E e F, por outro lado, não apresentaram caráter dispersivo, possuindo percentuais de dispersão próximos a zero.

5.3 Densidade real

A densidade real foi realizada para o solo, RCD e compósitos, estando os resultados obtidos contidos na Tabela 18. Verifica-se que o solo apresenta um valor de 2,62 de densidade real, número que se assemelha aos encontrados por Carvalho (2017), Machado *et al.* (2017), nos estudos com areia siltosa.

Já o RCD apresentou valor de densidade igual a 2,61 g/cm³, o qual é próximo do encontrado por Macedo (2016) e Macedo (2013), as quais utilizaram o mesmo tipo de resíduo. Observa-se com esses resultados que o solo e o RCD possuem valores próximos, confirmando a semelhança na composição granulométrica dos dois materiais.

Tabela 18 - Densidade real das amostras de solo, RCD e compósitos

Material	D 20 °C (g/cm ³)
Solo	2,62
RCD	2,61
A	2,65
B	2,65
C	2,63
D	2,66
E	2,64
F	2,62

Fonte: A autora

Em relação aos compósitos peneirados, percebe-se que a substituição parcial de solo por RCD praticamente não altera os valores de densidade, sendo, entretanto, maior para os compósitos A e B e menor para o C. Nos compósitos não peneirados o comportamento da densidade foi semelhante. Contudo, os compósitos D, E e F mostraram um padrão de comportamento da densidade, sendo seu valor tanto menor quanto maior foi a quantidade de RCD incorporado.

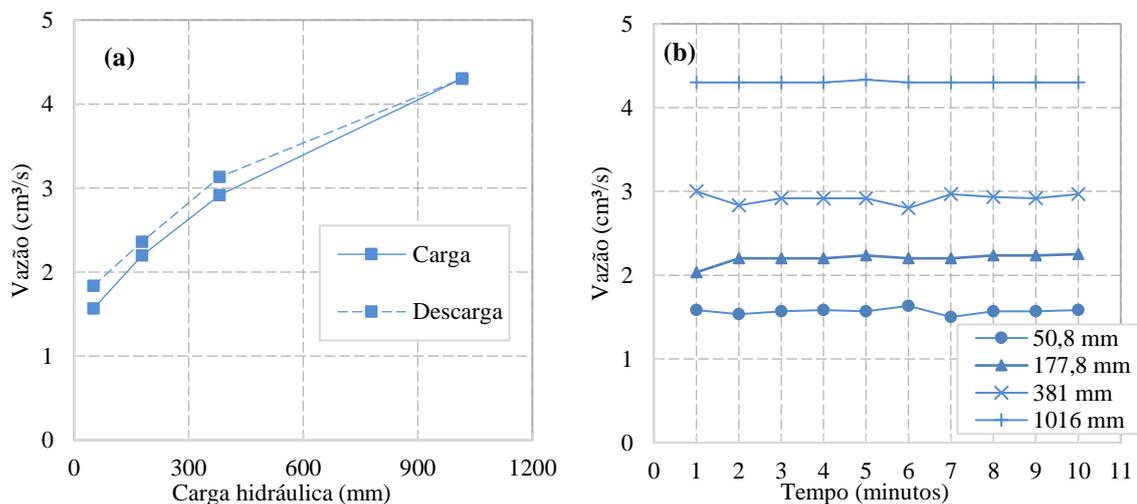
5.4 Limites de Atterberg

Para as amostras de solo, RCD e compósitos não foram observados limites de liquidez e de plasticidade, tendo comportamentos não plásticos. Tal resultado é explicado pelo alto teor de areia em sua composição, em detrimento do baixo percentual de componentes coesivos, assim como encontrado por Hammes *et al.* (2017), Reis e Matos (2017) e Martins, Fernandes e Campos (2016).

5.5 Pinhole Test

O ensaio do Pinhole foi utilizado para verificar se o solo apresenta dispersividade, através da análise da vazão de água percolante em cargas hidráulicas determinadas. O ensaio foi feito ainda para o RCD, compósitos e materiais adicionados de cal hidratada. A Figura 28a apresenta as vazões de carga e descarga aplicadas ao corpo-de-prova do solo, conforme proposto por Lafayette (2006). O comportamento da vazão ao longo do tempo em cada carga hidráulica é mostrado na Figura 28b.

Figura 28 - Ensaio de Pinhole test: vazão x carga hidráulica (a); vazão x tempo (b)



Fonte: A autora

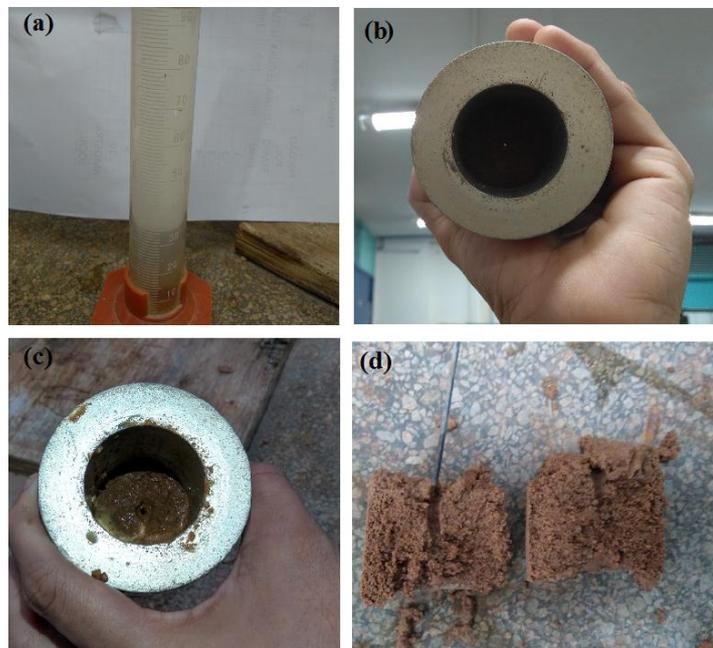
É possível observar que a carga hidráulica inicial de 50,8 mm acarretou no solo uma vazão média de 1,57 ml/s e durante os 5 minutos iniciais apresentou coloração levemente escura (Figura 29 a), por isso, prosseguiu-se o ensaio por mais 5 minutos. Ao fim do tempo, o efluente permaneceu com o mesmo aspecto e o diâmetro do furo aumentou cerca de duas vezes em

relação ao furo inicial (Figura 29 b e c), podendo este ser observado em um corte longitudinal da amostra (Figura 29 d).

Com esse resultado o solo foi classificado como D2, ou seja, dispersivo. Por outro lado, optou-se por prosseguir o ensaio nas demais cargas com o mesmo tempo e verificar o aspecto da água por 10 minutos, assim como para a primeira carga hidráulica. Exceto para a carga de 180 mm, com as cargas de 380 mm e 1020 mm foi mantida a coloração turva, obtendo-se as vazões de 2,20 ml/s, 2,92 ml/s e 4,30 ml/s, respectivamente, tendo o ensaio uma duração total de 40 minutos na fase de carga.

Porém, na fase de alívio de carga, a qual foi realizada com dez minutos de duração para cada carga, totalizando 30 minutos, a vazão apresentou leve acréscimo, não sendo notado nenhum valor discrepante de vazão. Dessa forma, manteve-se a classificação do solo como sendo dispersivo.

Figura 29 - Coloração da água após a carga hidráulica de 50, 8 mm (a); diâmetro do furo antes do ensaio (b); diâmetro do furo após o ensaio (c); corte longitudinal do corpo-de-prova após o ensaio (d)



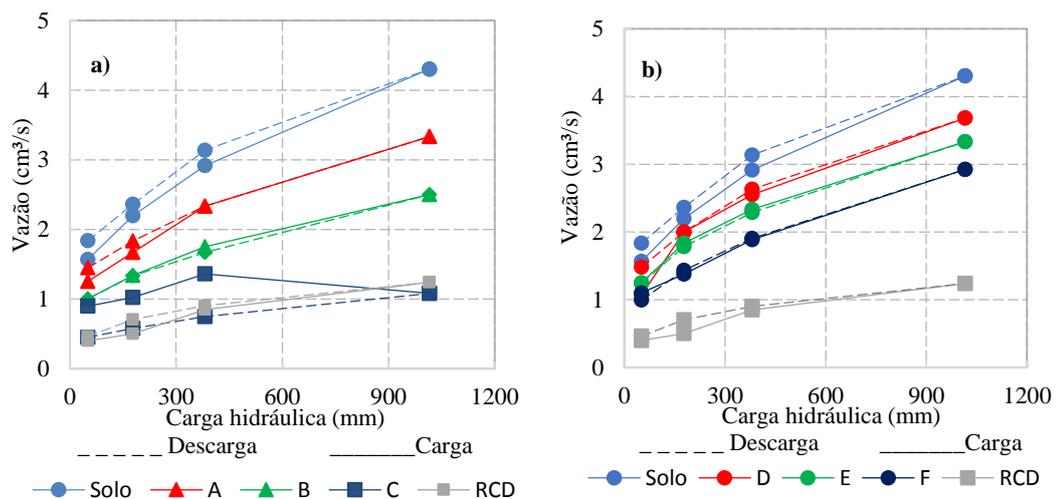
Fonte: A autora

Os materiais sem adição de cal hidratada submetidos ao ensaio tem seus comportamentos indicados na Figura 30. O resíduo não demonstrou dispersividade, sendo mantidos os diâmetros dos furos dos corpos-de-prova ensaiados e o aspecto de água limpa ao longo do ensaio. Quanto aos compósitos peneirados, observou-se que a substituição da fração fina do solo por RCD foi

eficaz para todos os percentuais analisados, tendo em vista que os materiais A, B e C não demonstraram dispersividade, tendo sua classificação como ND1.

É possível analisar que a vazão nos compósitos A, B e C foi reduzida gradativamente com o aumento da substituição de solo por fração fina de RCD, sendo a menor vazão relativa ao compósito C (Figura 30 a). Este, diferentemente dos demais, demonstrou grande distanciamento entre as vazões de carga e descarga, evidenciando redução do diâmetro do furo, o qual se relaciona ao carreamento de partículas que se alojaram na trajetória do fluxo na fase de alívio de carga, refletindo uma erosão mecânica. Tal fato é corroborado pela presença de sedimentos no cascalho do equipamento utilizado. De forma geral, o comportamento dos compósitos variou entre o do solo e do RCD, tendo o compósito C vazões semelhantes à do RCD.

Figura 30 - Vazão x carga hidráulica dos compósitos peneirados (a) e sem peneiramento (b)



Fonte: A autora

Os resultados dos compósitos não peneirados são semelhantes no que diz respeito à mudança de vazão com o aumento da incorporação do RCD, sendo também decrescente com maiores percentuais de mistura (Figura 30b). Entretanto, os valores de vazão são superiores aos dos compósitos peneirados, sendo mais próximos entre as diferentes misturas, e mais semelhantes ao comportamento e vazões do solo.

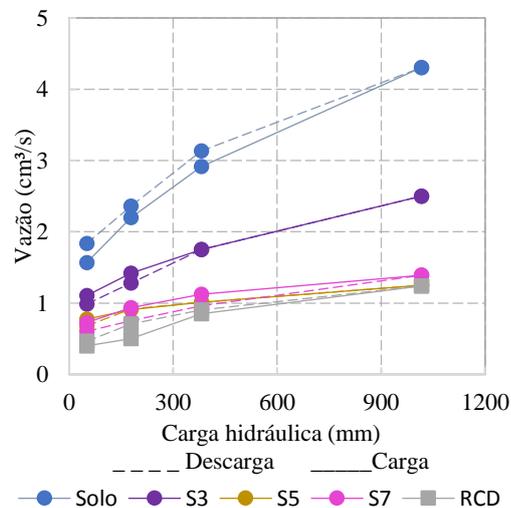
Outro aspecto relevante e distinto dos compósitos D, E e F em relação aos compósitos peneirados se refere à dispersividade. No compósito D, com 20% de RCD incorporado, houve turvamento da água percolante na carga de 380 mm, fato que demonstra que essa mistura, apesar de ter reduzido o caráter dispersivo, ainda apresenta traços de dispersividade, sendo

classificado com ND3 (levemente dispersivo). Nos demais compósitos, esse aspecto não foi mais verificado, sendo todas classificadas como ND1.

Em relação às misturas solo-cal, pode-se observar que as vazões, para todos os percentuais de adição, foram menores quando comparadas ao solo natural (Figura 31). As retas que representam as vazões de carga e de alívio de carga mudaram de comportamento, apresentando vazões semelhantes. Os valores das vazões foram muito próximos para as misturas S5 e S7, as quais se aproximam das vazões do RCD, enquanto que na mistura S3 as vazões são maiores que das demais misturas, sendo aproximadamente o valor médio entre o solo e o RCD.

Nas amostras de solo-cal não foi evidenciada mudança na turbidez da água, fato que demonstra que a dispersividade do solo é eliminada com a adição de cal, sendo as misturas classificadas como ND1. O diâmetro do furo dos corpos-de-prova foi mantido para todos os percentuais de adição, e no cascalho que é componente do equipamento do ensaio não foram verificadas partículas carregadas, demonstrando que a cal contribuiu também para a redução da erodibilidade do solo.

Figura 31 - Vazão x carga hidráulica das misturas solo-cal

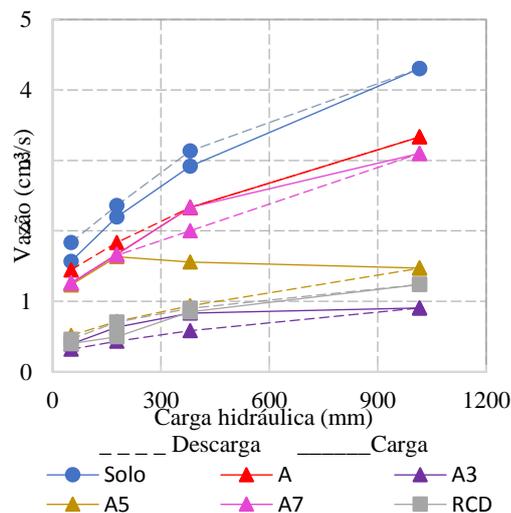


Fonte: A autora

O compósito A com as diferentes adições tem a representação das vazões e das cargas hidráulicas apresentadas na Figura 32. O menor valor de vazão se refere à mistura A3 e o maior a A7, sendo o comportamento da maior adição muito semelhante ao do compósito sem cal. De forma geral, o aumento da quantidade de cal hidratada incorporada provocou aumento da vazão, entretanto, os valores foram inferiores à vazão do solo.

Não se verificou nas misturas com cal mudança de coloração na água, e por isso foram classificadas como não dispersivas, no entanto, diferentemente das misturas solo-cal, evidenciou-se mudança no tamanho do furo ao final do ensaio, o qual provocou distinção entre as vazões de carga e de descarga. O aumento do furo, tendo em vista as condições finais dos materiais após o ensaio e a deposição de sedimentos no cascalho, foi provocado por erosão mecânica. Isto comprova que no compósito A (80% solo + 20% RCD, peneirado), a adição de cal hidratada eliminou a dispersividade, entretanto, a erodibilidade foi aumentada, não sendo, portanto, o compósito ideal para melhoria desta propriedade.

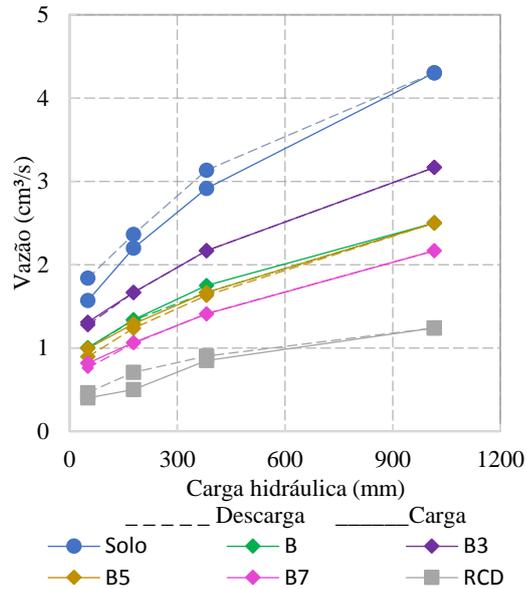
Figura 32 - Vazão x carga hidráulica do compósito A adicionado de cal



Fonte: A autora

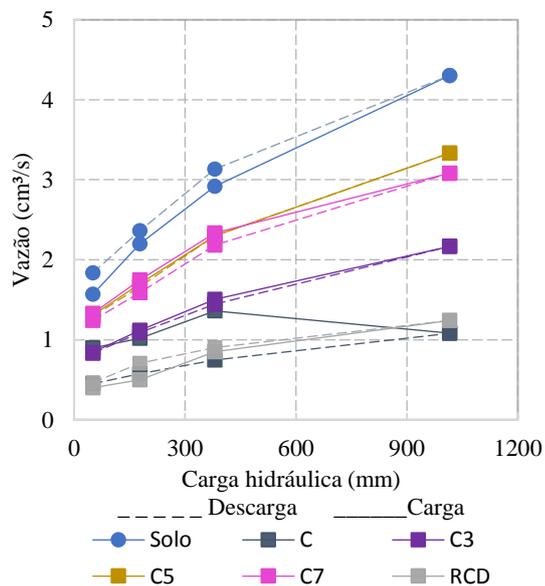
O compósito B (Figura 33), que possui 40% de RCD em sua composição, assim como o compósito A não demonstrou turbidez na água percolante, sendo classificado como ND1 em todas as misturas com cal. Dentre os compósitos peneirados, o B foi o que apresentou maior uniformidade de características, quando adicionado de cal. O aumento da quantidade de cal incorporada implicou na redução da vazão, mostrando melhor arranjo das partículas durante a passagem do fluxo de água.

No que diz respeito ao diâmetro do furo dos corpos-de-prova, não foi notada nenhuma alteração, estando os diâmetros com a mesma dimensão do início do ensaio. Tal característica pode ser observada também por meio do gráfico da Figura 33, pois com as adições de cal não se evidenciou distinção entre as vazões de aumento e de decréscimo de carga hidráulica, mostrando que neste compósito a erodibilidade do solo, por ação mecânica, também foi melhorada.

Figura 33 - Vazão x carga hidráulica do compósito B adicionado de cal

Fonte: A autora

O compósito C (40% solo + 60% RCD, peneirado) (Figura 34), quando adicionado de cal, teve comportamento muito semelhante ao compósito B (60% solo + 40% RCD, peneirado). Assim como nos demais compósitos peneirados, não houve mudança do aspecto da água percolante, sendo todas as misturas não-dispersivas. O diâmetro do furo, que tinha aumentado no compósito sem cal, não demonstrou alterações, sendo as vazões de carga e descarga muito semelhantes. Dessa forma, o compósito C apresentou melhoria do caráter dispersivo do solo e não apresentou erosão mecânica para os materiais analisados.

Figura 34 - Vazão x carga hidráulica do compósito C adicionado de cal

Fonte: A autora

Sendo assim, de forma geral, a adição de cal hidratada provocou melhoria do caráter dispersivo do solo, tanto nas misturas solo-cal, quanto nos compósitos. Sem a cal, no entanto, nos compósitos que não passaram por peneiramento, apenas a partir de 40% de RCD o comportamento dispersivo foi eliminado. Os resultados das classificações do ensaio de Pinhole estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação quanto à dispersividade pelo ensaio de Pinhole Test

Material	Composição	Classificação	Dispersividade
Solo	100% Solo	D2	Dispersivo
RCD	100% RCD	ND1	Não dispersivo
A	80% Solo + 20% RCD (peneirado na n° 50)	ND1	Não dispersivo
B	60% Solo + 40% RCD (peneirado na n° 50)	ND1	Não dispersivo
C	40% Solo + 60% RCD (peneirado na n° 50)	ND1	Não dispersivo
D	80% Solo + 20% RCD	ND3	Levemente dispersivo
E	60% Solo + 40% RCD	ND1	Não dispersivo
F	40% Solo + 60% RCD	ND1	Não dispersivo
S3	Solo+3% Cal	ND1	Não dispersivo
S5	Solo+5% Cal	ND1	Não dispersivo
S7	Solo+7% Cal	ND1	Não dispersivo
A3	A+3% Cal	ND1	Não dispersivo
A5	A+5% Cal	ND1	Não dispersivo
A7	A+7% Cal	ND1	Não dispersivo
B3	B+3% Cal	ND1	Não dispersivo
B5	B+5% Cal	ND1	Não dispersivo
B7	B+7% Cal	ND1	Não dispersivo
C3	C+3% Cal	ND1	Não dispersivo
C5	C+5% Cal	ND1	Não dispersivo
C7	C+7% Cal	ND1	Não dispersivo

Fonte: A autora

Em relação a cal hidratada, é válido destacar que os percentuais ideais variaram de material para material, pois agem de forma distinta de acordo com a proporção dos componentes. Verifica-se portanto, que para a melhoria de dispersividade do solo, a utilização de cal é eficaz, porém, nos compósitos peneirados os melhores resultados foram encontrados para os compósitos B e C.

5.6 Ensaio de expansibilidade

O ensaio de expansibilidade foi executado para aferir a variação percentual da altura do solo de estudo quando submetido ao contato com água, por meio de capilaridade. Para sua aplicação, a amostra de solo foi compactada conforme instruções da norma DNIT 160/2012. As leituras efetuadas no extensômetro durante a execução do ensaio estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Variação de altura da amostra ao longo do tempo

Tempo	Unidade	Leitura (mm)
0	min	0,03
15	min	0,14
30	min	0,15
45	min	0,15
1	h	0,15
2	h	0,16
3	h	0,16
4	h	0,16
5	h	0,16
6	h	0,16
ε (%) =		0,87%

Fonte: A autora

Por meio da Tabela 20, nota-se que o ensaio poderia ter sido encerrado quando decorridas as 3 horas iniciais, porém, por apresentar variação mínima de dimensão, optou-se por executar o ensaio durante 6 horas. O valor obtido da expansibilidade foi de 0,87%. Segundo Lafayette (2006), para apresentar comportamento de regular a bom frente à erosão, o valor deve ser inferior a 11%, estando o solo de estudo dentro do intervalo estabelecido.

Contudo, como era esperado, o resultado obtido é distinto das observações realizadas no solo em campo, as quais apontam relevante erosão. Isso reforça que a metodologia proposta pelo LNEC de fato tem aplicação apenas regional, não devendo ser aplicada a solos tropicais, visto que dificilmente representa a erodibilidade destes solos. Essa conclusão também se deve ao fato de que o material em estudo apresentou características que indicam carreamento de partículas, devido à intensa ação de lixiviação por ação da água.

Portanto, nesta pesquisa, assim como na de Lafayette (2006), a expansibilidade não foi considerada um índice determinante para representar o comportamento erodível do solo, tendo em vista que as observações realizadas em campo, as quais, diferem daquele apresentado neste ensaio. Tal conclusão é corroborada ainda por meio da realização dos demais ensaios de erodibilidade (*Crumb Test*, ensaio SCS e *Pinhole Test*), os quais apontam a característica erodível do solo.

5.7 Composição química

Por meio dos ensaios químicos é possível verificar a dispersividade do solo, através da quantidade de sais dissolvidos na água intersticial. Além disso, foram obtidas as informações relativas ao complexo sortivo, soma de bases trocáveis, capacidade de troca catiônica e o percentual de saturação por bases, estando apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Propriedades químicas do solo

Complexo sortivo (cmol/Kg)						Parâmetros		
Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	H^+	Al^{3+}	S (cmol/kg)	CTC (cmol/kg)	V(%)
0,70	0,50	0,13	0,01	0,74	0,03	1,34	2,11	64

Fonte: A autora

Os valores do complexo sortivo são as partículas trocadoras de íons do solo (EMBRAPA, 2017). A capacidade de troca catiônica (CTC) é a capacidade do solo de manter esses íons, mantidos pela argila carregada negativamente, e o percentual de saturação por bases (V%), representa a proporção da CTC do solo que é preenchida pelas bases trocáveis (EMBRAPA, 2017).

Em relação à soma de bases trocáveis (S), valor referente à soma dos valores de cálcio, magnésio, sódio e potássio, observa-se que o valor é de 1,34 cmol/kg. Esta informação é utilizada para o cálculo do CTC, que diz respeito ao valor S, adicionado das bases de hidrogênio e alumínio, atingindo um valor de 2,11 cmol/kg. Os valores são considerados baixos (CTC < 27 cmol/Kg) de acordo com Ferreira *et al.* (2017), indicando que o solo não é expansivo.

O percentual de saturação por bases (V%), que apresenta valor de 64%, no entanto, é considerado como alto (V% > 50%) pelos autores. Dessa forma, segundo EMBRAPA (2017), o solo é classificado como eutrófico, ou seja, é um solo que apresenta uma alta taxa de fertilidade, podendo ser utilizado para cultivos.

A análise química total, feita por meio da fluorescência de raios X, foi realizada para verificação dos percentuais dos demais componentes do solo sob a forma de óxidos. Os mesmos quantitativos foram estudados também para o resíduo, estando os valores apresentados na

Tabela 22. Os resultados mostram que o solo é predominantemente constituído por sílica (56,63%), óxido de alumínio (27,48%) e óxido de ferro (4,94%).

Tabela 22 - Percentuais de óxidos presentes no solo e no RCD

Solo	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO
	0,03	0,09	27,48	56,63	0,04	0,08	0,22	0,07	1,38	0,02	0,01
	Fe₂O_{3t}	NiO	CuO	ZnO	Rb₂O	SrO	Y₂O₃	ZrO₂	BaO	PbO	P.F
	4,94	tr	-	0,01	-	tr	0,01	0,3	-	0,01	8,68
Resíduo	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO
	0,31	1,02	22,02	44,01	0,31	2,04	1,57	10,21	0,85	0,02	-
	Fe₂O_{3t}	NiO	CuO	ZnO	Rb₂O	SrO	Y₂O₃	ZrO₂	BaO	PbO	P.F
	4,28	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	tr	0,12	0,07	0,01	13,08

Fonte: A autora

Os resultados do solo são compatíveis, tendo em vista que o material é basicamente constituído por quartzo. Segundo Rocha (2018) expressivas quantidades de óxidos de ferro e alumínio conferem ao solo alto grau de cimentação, interferindo diretamente no ganho de resistência do solo, porém indicam ação de intemperismo. Quanto ao RCD também há predomínio de SiO₂ (44,01%), Al₂O₃ (22,02%) e Fe₂O₃ (4,28%).

Entretanto, diferentemente do solo, o resíduo apresenta em sua composição 10,21% de óxido de cálcio, que está ligado à presença de cal hidratada. Isso se deve à grande heterogeneidade inerente ao RCD utilizado, o qual é um material misto, composto por diversos componentes construtivos. O óxido de cálcio, junto aos óxidos de ferro e de alumínio agem no ganho de resistência por meio de reações cimentantes, as quais agem ao longo do tempo (ROCHA, 2018).

A perda ao fogo é uma informação importante, pois, segundo Scarin e Bernardes (2016) através desse índice é possível verificar quais os materiais que possuem maiores quantidades de argilominerais e hidróxidos de ferro e alumínio. Nesse aspecto, o RCD apresentou maior percentual de perda, demonstrando que há uma maior quantidade de argilominerais presentes, quando se compara ao solo. Esta característica está relacionada a composição diversificada do resíduo, o qual é composto por materiais de origens diversas.

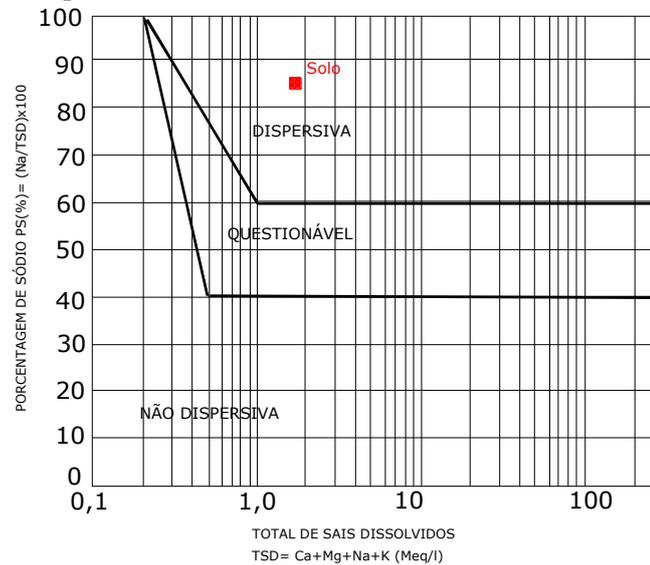
Em relação à análise de salinidade da água intersticial, verificou-se os teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio dissolvidos em água, e com eles foram calculados os parâmetros de análise da dispersividade, sendo os valores apresentados na Tabela 23. Os resultados obtidos demonstram que no solo, o percentual de sódio na água livre é alto em relação aos demais sais presentes, com valor de 85,47%.

Tabela 23 - Características químicas da água intersticial do solo

Teores de sais na água intersticial				Parâmetros		
Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	TSD	PS(%)	RAS
(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	
0,06	0,19	1,53	0,01	1,79	85,47	4,37

Fonte: A autora

Com base neste parâmetro, junto ao total de sais dissolvidos (TSD), e utilizando a metodologia proposta por Sherard, Dunningan e Decker (1976), verificou-se que o solo se enquadra na classificação da zona dispersiva (Figura 35), corroborando os resultados verificados nos ensaios de *Crumb Test*, Ensaio SCS e *Pinhole Test*.

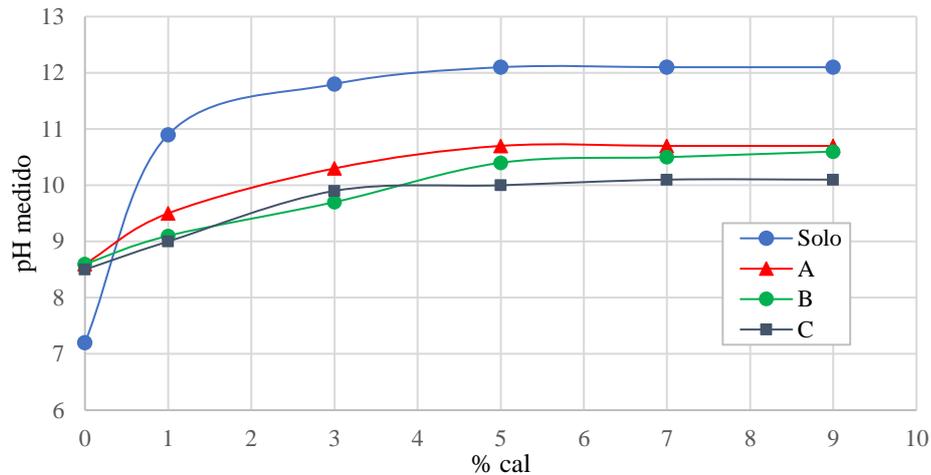
Figura 35 - Relação entre o percentual de sódio e o total de sais dissolvidos do solo

Fonte: Sherard, Dunningan e Decker (1976) (adaptado)

5.8 Ensaio de pH

O estudo do pH do solo foi feito para determinar o teor mínimo de cal hidratada para o qual se modifique o seu valor de pH e de seus compósitos com RCD. Buscou-se com o ensaio verificar os percentuais de cada mistura que apresentem valor próximo a 12,42 ou valor constante com o aumento da dosagem de cal. Os valores referentes ao pH de cada mistura e o correspondente teor de cal estão apresentados na Figura 36.

No solo natural o pH tem valor de 7,2, sendo considerado de neutro a levemente alcalino por ter valor próximo de 7. Para os compósitos peneirados, no entanto, o pH é básico de valor igual a aproximadamente 8,5 em todas as composições, não sendo o pH natural destas influenciado pela quantidade de RCD adicionado.

Figura 36 - Valores de pH relacionados aos percentuais de cal aplicados no solo e compósitos

Fonte: A autora

Em todas as amostras analisadas à medida que se adicionou cal, manteve-se um comportamento de crescimento do pH, e assim as amostras se tornaram mais básicas. Para os percentuais analisados, apenas na amostra de solo foi possível atingir o valor de 12,14, próximo ao estabelecido pela metodologia de Eades e Grim (1966), sendo esse obtido para a adição de 9% de cal. Entretanto, o comportamento constante do pH se iniciou com 5% de cal.

Semelhante ao solo, nos compósitos A, B e C, o percentual no qual se obteve comportamento aproximadamente constante do pH também foi de 5%, sendo o valor de pH tanto maior quanto menor foi o percentual de RCD. Nos compósitos, foram observados valores de pH máximos iguais a 10,68, 10,56, e 10,09, para 20%, 40% e 60% de RCD, respectivamente. É válido ressaltar que para esses materiais não se obteve valor de pH igual a 12,42, como proposto pela metodologia utilizada por Ferreira *et al.* (2017), no entanto, atende-se ao comportamento constante de pH à medida que se adicionou percentuais maiores de cal, conforme apontado por Samaniego (2015).

O comportamento diferenciado dos valores de pH nas amostras, explica-se pelo percentual de materiais argilosos nos diferentes compósitos. Por apresentar maior percentual de argila, fração do solo que reage com a cal, o solo apresentou valores superiores de pH em relação aos compósitos de RCD. Nestes, à medida que se aumenta a quantidade de substituição de solo por RCD, reduz-se o percentual de argila referente ao solo, e dessa forma, por ter menor valor de parcelas reagentes, o valor de pH diminui.

Pelos resultados apresentados, optou-se por utilizar os percentuais de 3%, 5% e 7% de cal hidratada para estudo do comportamento mecânico do solo e misturas de RCD, sendo estes

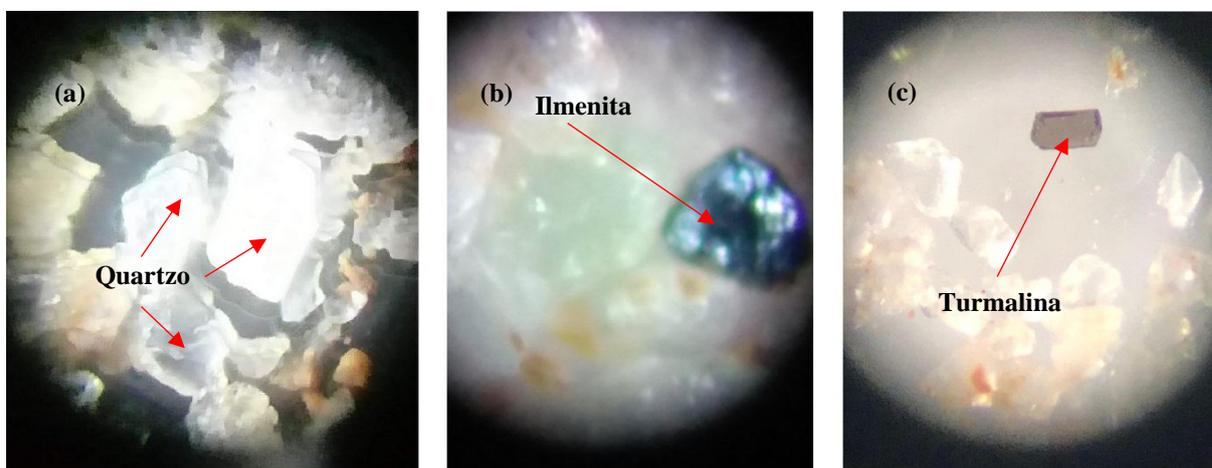
aplicados por Ferreira *et al.* (2017), Villalba (2015) e Samaniego (2015). A adição de 5% e 7% foi utilizada, pois, são os dois menores percentuais com os quais se obtém constância de pH. Entretanto, optou-se por estudar também o percentual de 3%, com intuito de verificar se com ele há aumento de resistência, utilizando um menor consumo de cal.

5.9 Ensaios mineralógicos

Por meio observação dos minerais presentes nos grãos do solo com a lupa binocular, verificou-se a presença de domínio de grãos de quartzo hialino (Figura 37 a), com esfericidade média e arredondamento de sub angular a angular e brilhoso, segundo a classificação de Powers (1953). A grande quantidade de quartzo é compatível, tendo em vista que o solo é arenoso.

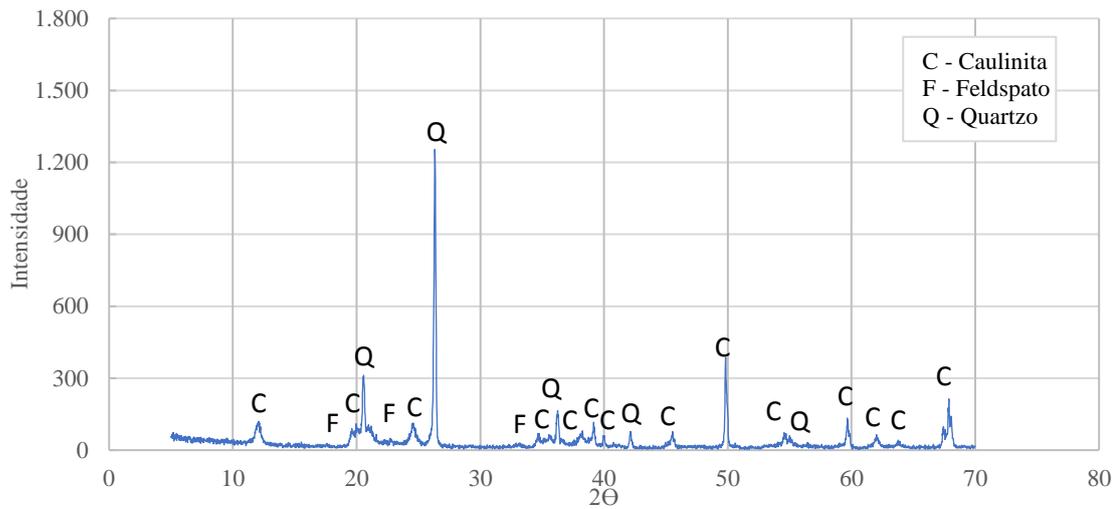
Os seus grãos apresentam brilho, demonstrando que os seus sedimentos sofreram transporte subaquoso (BARROS *et al.*, 2007), ou seja, suas partículas foram deslocadas embaixo da água. Foi observada a presença de argila e ferro nos grãos de quartzo, estando aderidas às partículas. Detectou-se ainda, a presença de raros minerais acessórios, como o zircão, a ilmenita (Figura 37 b), turmalina (Figura 37 c), mica, silimanita, horniblenda e aluminossilicatos.

Figura 37 - Análise mineralógica do solo com presença de quartzo (a), ilmenita (b) e turmalina (c)



Fonte: A autora

A fração passante na peneira 0,075 mm foi analisada por difratometria para complementar a análise mineralógica. O difratograma do solo está apresentado na Figura 38, e por ele é possível detectar a presença de caulinita, feldspato e quartzo. O quartzo apresentou o maior pico, enquanto que a caulinita foi o argilomineral com o segundo maior pico. Segundo Scariot (2018) a presença de quartzo nessa fração está relacionada a sua difícil intemperização.

Figura 38 - Difratoograma do solo

Fonte: A autora

A amostra de RCD também foi analisada com a lupa e com a difratometria de raios X. Por meio da análise com lupa binocular, verificou-se que assim como no solo, há uma grande quantidade de grãos de quartzo, sendo estes, brilhosos, arredondamento variando de sub angulosos a angulosos, podendo estar recobertos por argilominerais, e com impregnação de óxidos e hidróxidos de ferro. Por ser um material muito heterogêneo, foram identificados fragmentos de rocha (Figura 39), relacionados aos agregados presentes no RCD, e minerais acessórios como a muscovita, a presença de biotita e o caulim.

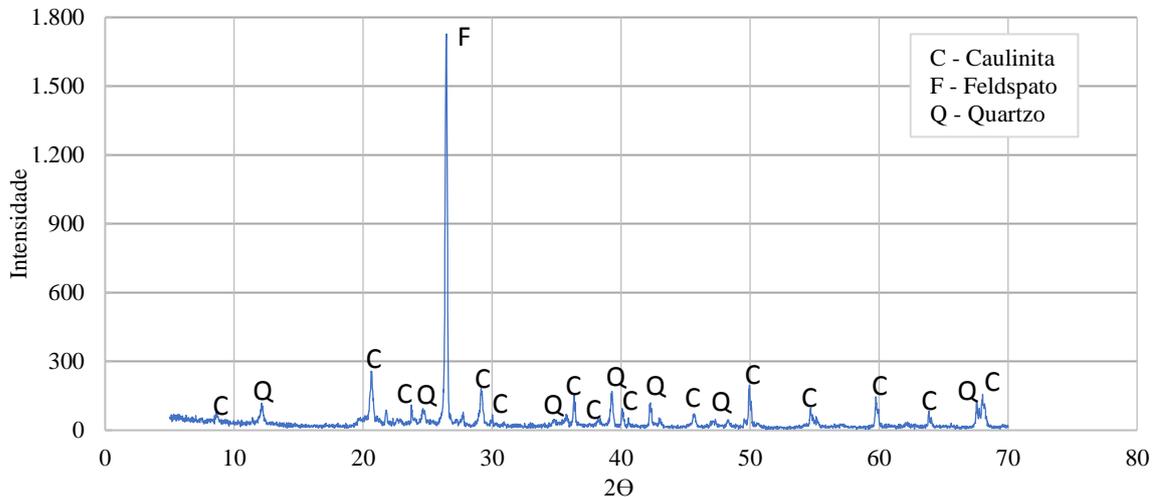
Figura 39 - Avaliação da composição do RCD com uso de lupa binocular

Fonte: A autora

A difração de raios X aplicada ao RCD (Figura 40) mostra que, assim como no solo, a fração analisada é composta por quartzo, feldspato e caulinita. Porém, o quartzo foi o componente que

se mostrou em menor intensidade, sendo o feldspato aquele mineral que apresentou maior pico, seguido pela caulinita, tendo esta mais picos que no difratograma do solo.

Figura 40 - Difratograma do RCD

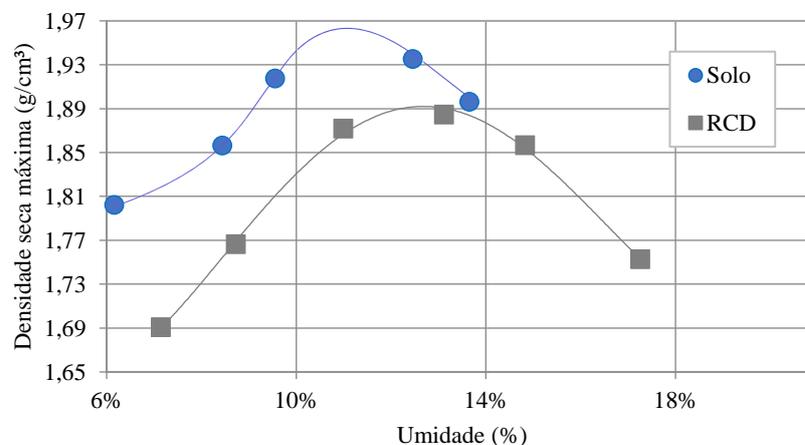


Fonte: A autora

5.10 Compactação

As amostras de solo e RCD foram submetidas à realização do ensaio de compactação, como descrito pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016b), sendo as curvas obtidas por meio do ensaio mostradas na Figura 41, enquanto que os valores referentes à umidade ótima e densidade seca máxima se encontram na Tabela 24.

Figura 41 - Curvas de compactação do solo e do RCD



Fonte: A autora

Tabela 24 - Valores de umidade ótima e densidade seca máxima do solo e do RCD

Material	Umidade ótima (%)	Densidade seca máxima (g/cm ³)
Solo	11,17	1,957
RCD	12,69	1,892

Fonte: A autora

A curva de compactação do solo demonstra que a umidade ótima tem um valor de 11,17% e densidade seca máxima de 1,957 g/cm³, valores próximos aos encontrados no solo utilizado por Carvalho (2017), uma areia siltosa, o qual possui umidade ótima de 11,60% e densidade seca máxima igual a 1,937 g/cm³. O RCD, por sua vez, apresentou valor de umidade ótima igual a 12,69% e densidade seca máxima de 1,892 g/cm³, sendo compatível com o resultado encontrado por Couto (2017), que utilizou um solo classificado como areia bem graduada, com umidade ótima igual a 12,5% e densidade seca máxima de valor 1,88 g/cm³.

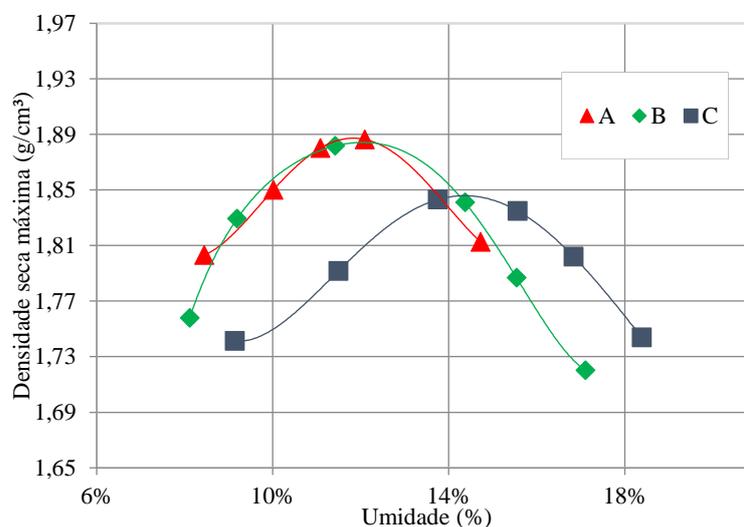
Por meio desses resultados, observa-se que o RCD apresenta valor levemente superior em relação ao teor de umidade ótima e menor em relação à densidade máxima. Os valores encontrados são compatíveis, tendo em vista que, em geral, os agregados reciclados de RCD apresentam maior absorção, necessitando de maior teor de água para obtenção da densidade seca máxima. Tal afirmação é corroborada pelos autores Silva e Vilela (2018), os quais apontam que o RCD possui, em comparação a materiais de composição semelhante, maior absorção e menor massa específica.

Na Figura 42 são apresentadas as curvas de compactação dos compósitos peneirados, enquanto que os valores de umidade ótima e densidade seca máxima estão na Tabela 25. É possível observar nos compósitos que o aumento do percentual de substituição de solo por RCD implica diretamente na umidade ótima, cujo valor é crescente tanto quanto for o valor percentual de RCD, variando na faixa de 11,84% a 14,36%. O peso específico, no entanto, apresentou característica oposta, demonstrando redução de valor à medida que se aumentou o quantitativo de RCD.

Este comportamento foi encontrado na pesquisa de Matuella (2017) e no estudo de Santos *et al.* (2015) no qual, assim como nesta pesquisa, o solo utilizado foi classificado como uma areia silto-argilosa, apresentando, portanto, características similares em relação à compactação de misturas com RCD. Em solos argilosos, entretanto a adição de RCD age de maneira contrária,

diminuindo a umidade ótima e aumentando a densidade seca máxima em virtude do aumento no quantitativo de grãos mais densos, conforme afirmado por Pivetta e Vendruscolo (2017).

Figura 42 - Curvas de compactação dos compósitos peneirados



Fonte: A autora

Tabela 25 - Valores de umidade ótima e densidade seca máxima dos compósitos

Material	Umidade ótima (%)	Densidade seca máxima (g/cm³)
A (80% Solo + 20% RCD, peneirado)	11,84	1,887
B (60% Solo + 40% RCD, peneirado)	12,05	1,884
C (40% Solo + 60% RCD, peneirado)	14,36	1,846

Fonte: A autora

Analisando as curvas de compactação dos compósitos, verifica-se que o comportamento de A e B é muito semelhante, possuindo pequenas variações nos valores de umidade ótima e densidade seca máxima, com 0,21 % e 0,003 g/cm³ de discrepância entre os valores, respectivamente. Esta característica foi apontada por Macedo (2016), a qual encontrou valores que possuem intervalo de variação iguais a 0,57% e 0,018 g/cm³ para a umidade ótima e densidade seca máxima.

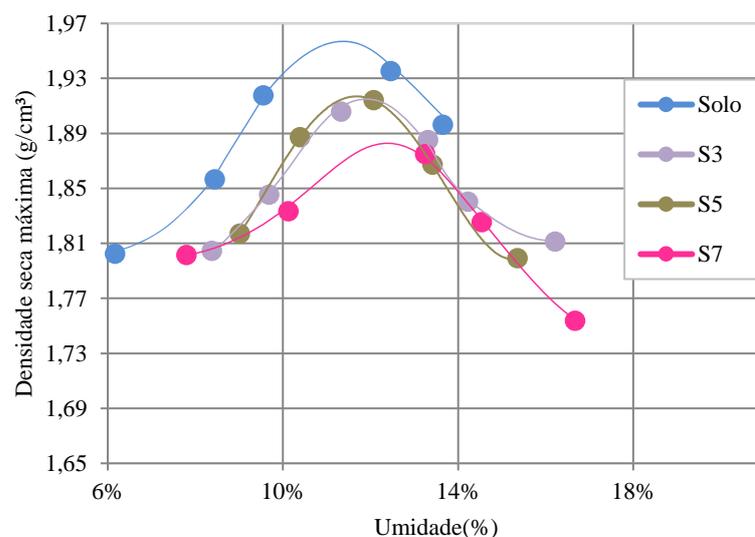
Quanto à curva referente ao compósito C, é possível perceber um aumento mais significativo em relação à umidade ótima, enquanto que o peso específico apresentou valor inferior às demais misturas. Considerando o fato de este material ter sua fração fina de solo modificada para um material que possui como característica uma maior absorção, o aumento no valor da umidade ótima é compatível, pois necessita-se, neste caso, de maior quantidade de água para proporcionar um melhor arranjo das partículas. Quanto a densidade seca máxima, explica-se a redução de valor devido à presença de grãos menos densos em sua composição.

Nas Figuras 43 a 46 são apresentadas as curvas de compactação das misturas de solo-cal e compósitos adicionados de cal hidratada. As curvas mostram também os compósitos solo-RCD sem adição de cal e com acréscimo de 3%, 5% e 7% de cal em massa de mistura seca. De maneira geral, a adição de cal no solo puro e nos compósitos provocou um aumento da umidade ótima e redução da densidade seca máxima, exceto para o compósito C, no qual, com o acréscimo de 3% e 5% de cal, foi verificado valor semelhante de umidade ótima em relação àquele sem aplicação da cal.

Em todas as curvas foi observado o aumento de umidade e a diminuição do peso específico, à medida que se adicionou cal. Esse comportamento é explicado por Rocha (2018), a qual afirma que tal característica se deve às reações ocorridas entre o solo e a cal, provocadas pelas trocas catiônicas das partículas colóides. Estas reações resultam em misturas com menor peso específico quando comparadas ao solo e solo-RCD puros.

Em relação ao solo, percebe-se a influência da adição de cal hidratada no aumento da umidade ótima e na redução do peso específico (Figura 43). Para as misturas com cal, é válido destacar que as curvas S3 e S5 estão praticamente sobrepostas, sendo os valores dos parâmetros analisados muito semelhantes. No entanto, de forma geral, as curvas do solo e solo-cal apresentaram o mesmo comportamento.

Figura 43 - Curvas de compactação das misturas solo-cal



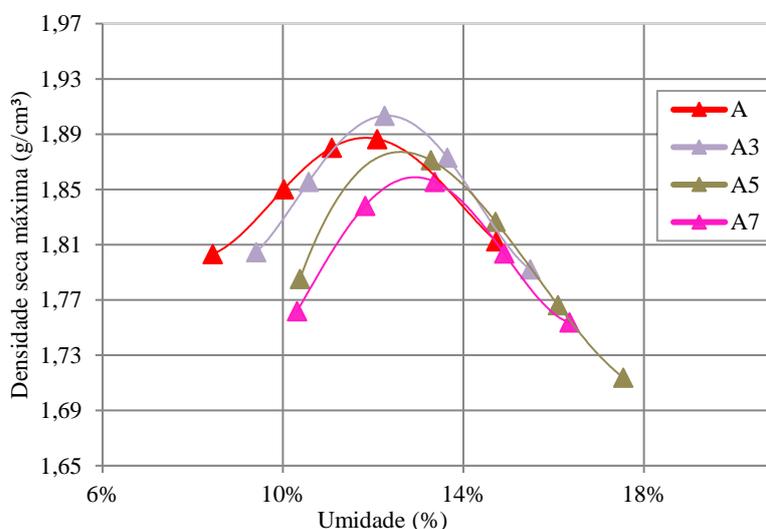
Fonte: A autora

Para os compósitos, verifica-se que para um mesmo percentual de cal hidratada, ao passo que se aumenta a substituição de solo por RCD, eleva-se a umidade ótima e reduz-se a densidade seca máxima. Essa característica é esperada devido a maior concentração de granulometria fina do RCD, bem como nos compósitos sem cal.

Nas misturas com o compósito A, a utilização da cal modificou as curvas de compactação em relação ao ramo seco. Entretanto, nos ramos úmidos das curvas, a adição de cal não provocou alterações, possuindo as misturas valores semelhantes de densidade seca e umidade, entre si (Figura 44).

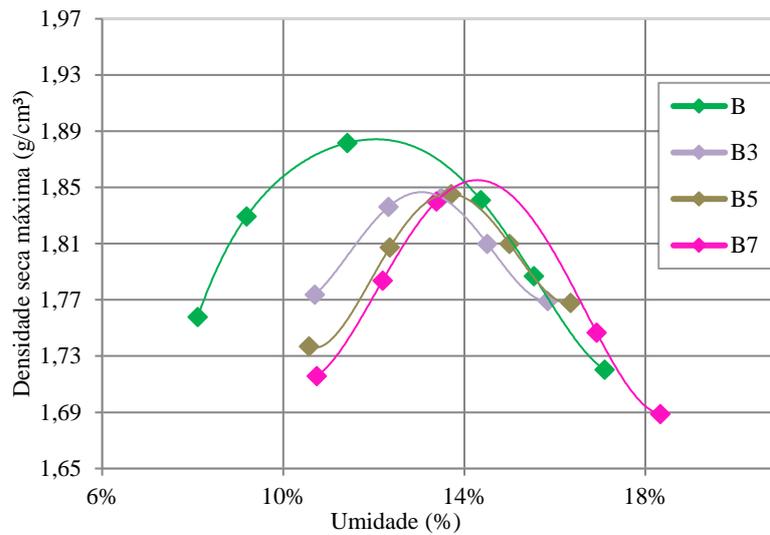
A tendência se manteve, exceto para a curva C3, que apresentou densidade seca máxima superior aos outros percentuais e inclusive à do compósito sem cal. A redução da densidade seca máxima atingiu cerca de 1,48% do valor sem cal e a umidade ótima registrou um aumento de 9,21% para a maior adição de cal.

Figura 44 - Curvas de compactação do compósito A adicionado de cal



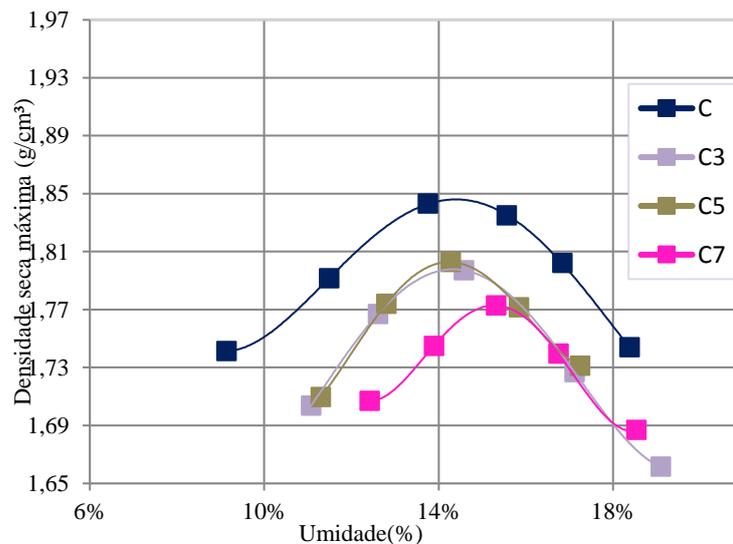
Fonte: A autora

As curvas do compósito B com cal hidratada estão apresentadas na Figura 45, sendo possível verificar que elas se distanciaram daquela que não possui adição de cal, além de demonstrar mudanças ligadas ao formato das curvas, estando as que possuem cal em sua composição com formas semelhantes. A cal provocou aumento na umidade ótima da ordem de 18,58% para o maior percentual de adição, enquanto que na densidade seca máxima houve redução de até 2,07% para a amostra B5. A amostra B7 também apresentou valor de densidade inferior quando comparado ao compósito sem cal, entretanto demonstrou valor levemente superior às demais.

Figura 45 - Curvas de compactação do compósito B adicionado de cal

Fonte: A autora

Com o acréscimo dos diferentes teores de cal, as curvas do compósito C mantiveram o formato inicial, havendo mudanças em relação aos teores de umidade ótima e densidade seca máxima (Figura 46). A tendência de deslocamento das curvas apresentada nas misturas anteriores se manteve também para o compósito de 60% de RCD, bem como para os valores de umidade dos ramos úmidos das misturas com cal.

Figura 46 - Curvas de compactação do compósito C adicionado de cal

Fonte: A autora

As adições de 3% e 5% de cal refletem praticamente os mesmos valores, tanto em relação à umidade ótima quanto à densidade seca máxima, situação diferente do compósito C7, o qual

apresenta aumento de 10,21% de umidade ótima em relação ao compósito sem cal, e redução da densidade. Comparando-se ao compósito sem cal, é possível perceber valores de umidade ótima semelhantes em C3 e C5, mas, no que diz respeito à densidade, todos os percentuais obtiveram redução, chegando até 3,58% de decréscimo.

Na Tabela 26 estão os valores de umidade ótima e densidade seca máxima do solo, RCD, compósitos peneirados, misturas solo-cal e compósitos adicionados de cal. Verifica-se que, para as misturas de cal com os compósitos e com o solo, os valores de umidade ótima são delimitados em uma faixa que varia entre 11,68% e 15,28%, conforme se substitui o solo por RCD e se acrescenta cal. Entretanto, o aumento não apresenta uma taxa fixa de elevação dos valores. As densidades seca máximas, por outro lado, apresentam valores que compreendem de 1,773 g/cm³ a 1,917 g/cm³, para os quais o maior valor é referente a mistura de solo e 5% de cal, e o menor deles para o compósito C7.

Tabela 26 - Umidades ótimas e densidades seca máximas do solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal

Material	Composição	Umidade ótima (%)	Densidade seca máxima (g/cm ³)
RCD	100% RCD	12,69	1,892
Solo	100% Solo	11,17	1,957
S3	Solo+3%Cal	12,01	1,913
S5	Solo+5%Cal	11,68	1,917
S7	Solo+7%Cal	12,31	1,887
A	80% Solo + 20% RCD (peneirado na nº 50)	11,84	1,887
A3	A+3%Cal	12,31	1,903
A5	A+5%Cal	12,61	1,877
A7	A+7%Cal	12,93	1,859
B	60% Solo + 40% RCD (peneirado na nº 50)	12,05	1,884
B3	B+3%Cal	13,06	1,846
B5	B+5%Cal	13,73	1,845
B7	B+7%Cal	14,29	1,855
C	40% Solo + 60% RCD (peneirado na nº 50)	14,36	1,846
C3	C+3%Cal	14,33	1,798
C5	C+5%Cal	14,24	1,803
C7	C+7%Cal	15,28	1,773

Fonte: A autora

O comportamento dos parâmetros obtidos se relaciona ao fato de que à medida que se aumenta o percentual de RCD e de cal hidratada, ocorre aumento na superfície específica dos grãos,

necessitando-se assim de mais água para garantir um melhor arranjo dos grãos da amostra, e, pelo mesmo motivo, a densidade seca máxima é reduzida. Tal afirmação é ratificada por Fuji (2012), a qual identificou que na mistura de solo com RCD e cal ocorre acréscimo da superfície específica. Da mesma forma, para Samaniego (2015), a adição de cal interfere na umidade ótima, pois, aumenta conforme se acrescenta maior teor de cal, melhorando o empacotamento dos grãos.

5.11 Compressão simples

As amostras de solo, RCD, solo-cal, compósitos peneirados e compósitos-cal foram ensaiadas para conhecimento da resistência à compressão simples, sendo obtidos os valores correspondentes às idades de rompimento de 7, 28 e 120 dias. Na Figura 47 são mostrados alguns corpos-de-prova submetidos ao ensaio de compressão simples, após a aplicação de carga. De forma geral, foi observado um tipo de ruptura frágil, ou seja, o solo rompeu sem evidências de grandes deformações.

Os planos de ruptura foram bem definidos (Figura 47 a), tendo a maioria demonstrado um ângulo de ruptura da ordem de 60° com o plano de aplicação da carga, exceto para as misturas de S3, que apresentou apenas microfissuras (Figura 47 b), e C7 (Figura 47 c), a qual demonstrou uma fissura vertical. O plano de ruptura típico também foi encontrado por Samaniego (2015) no seu estudo com um solo dispersivo siltoso.

Figura 47 - Plano de ruptura típico, a 60° (a); Microfissuras no corpo-de-prova solo + 3% cal (b); Plano vertical de ruptura (c)



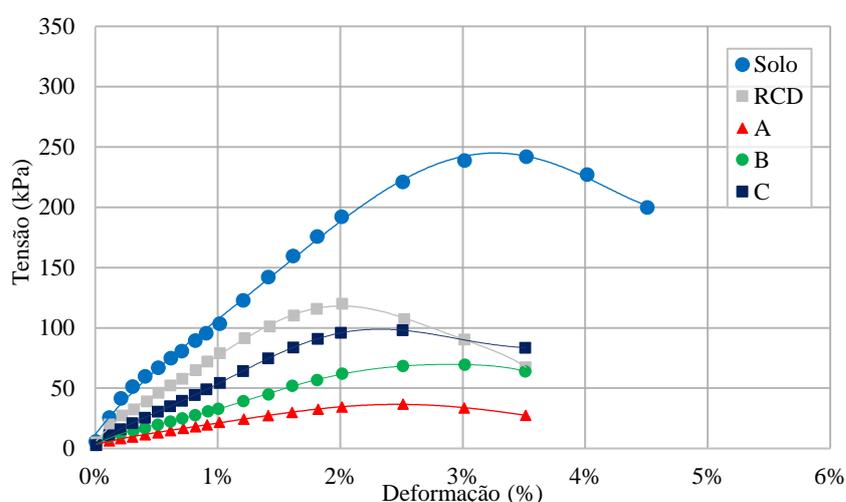
Fonte: A autora

Na Figura 48 são apresentadas as curvas de resistência à compressão dos corpos-de-prova de solo, RCD e solo-RCD após 7 dias de cura úmida. Na primeira idade de ruptura, os resultados observados variaram entre 37 kPa e 254 kPa, e demonstram que a maior resistência à compressão simples é aquela relativa ao solo, sendo seguida pelo RCD.

Em contrapartida, os compósitos A, B e C apresentam valores inferiores aos materiais, demonstrando, que a substituição da fração fina de solo por RCD interfere negativamente na resistência. Porém, há uma tendência de comportamento, na qual a resistência é crescente, à medida que se eleva o percentual de RCD substituído, tendo o compósito C resistência 250% maior que o compósito A.

Por meio das curvas é possível notar ainda que no solo há um maior deslocamento para atingir a carga máxima de ruptura, quando se compara aos demais materiais analisados na Figura 48. Esta característica, segundo Fuji (2012), deve-se à presença de argila.

Figura 48 – Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 7 dias

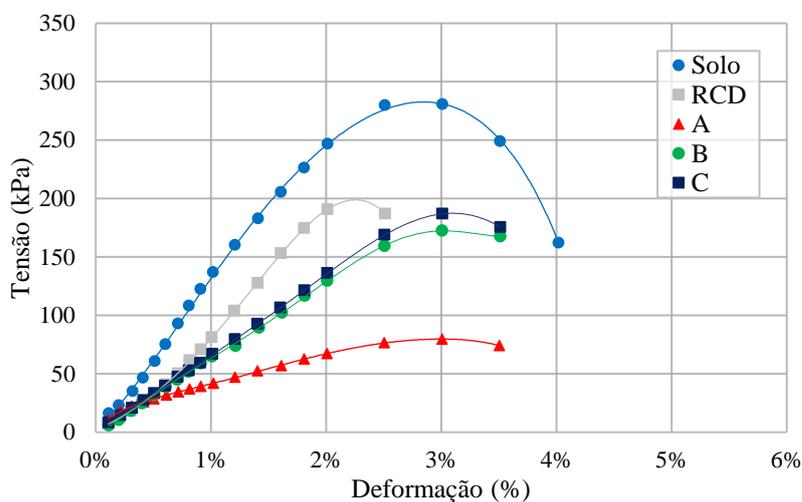


Fonte: A autora

Nas Figuras 49 e 50 são mostradas as curvas de tensão x deformação dos mesmos materiais aos 28 e 120 dias, respectivamente. É possível verificar que o comportamento em relação aos maiores valores de resistência permaneceram nessas idades de rompimento, assim como nos 7 dias. Os valores, entretanto variaram entre 85 kPa e 289 kPa, em 28 dias, e 580 kPa a 793 kPa em 120 dias.

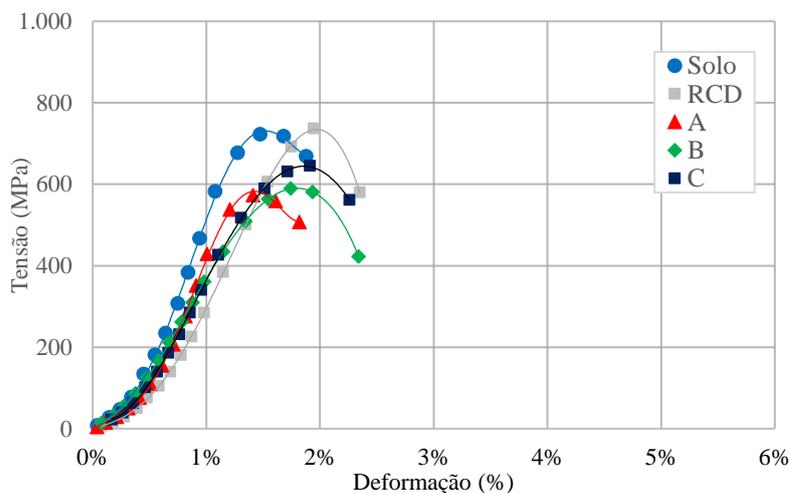
Quanto ao deslocamento, com o passar do tempo de cura, reduziu-se o intervalo para uma dada tensão máxima de ruptura, sendo os rompimentos ocorridos com menores deformações a partir do início do acréscimo de carga.

Figura 49 - Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 28 dias



Fonte: A autora

Figura 50 - Valores de tensão x deslocamento das amostras de solo, RCD e compósitos aos 120 dias



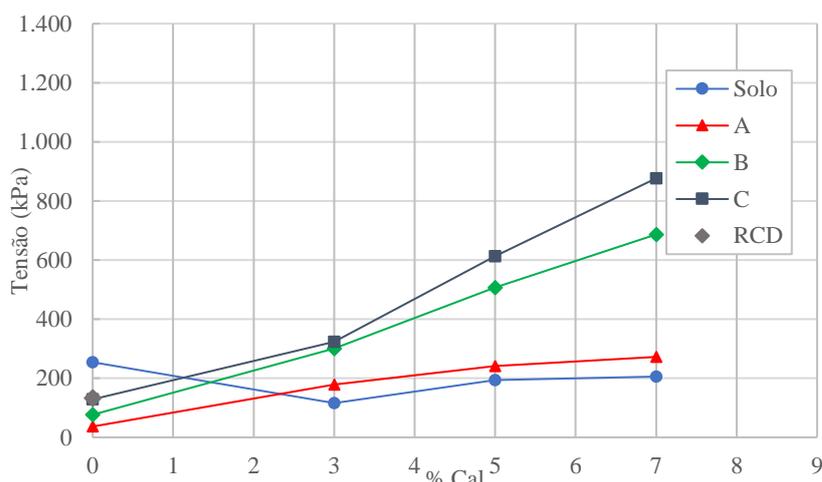
Fonte: A autora

Os efeitos da adição de cal hidratada nas amostras, para as idades de ruptura de 7, 28 e 120 dias, são mostrados nas Figuras 51 a 53, respectivamente, estando as curvas tensão x deformação dos materiais apresentadas no Apêndice B. Com a adição de cal, os comportamentos do solo e compósitos foram modificados.

As amostras de solo adicionadas de cal, aos 7 dias de cura (Figura 51), demonstraram redução dos valores de RCS, obtendo valores abaixo do solo sem adição. Assim, entende-se, neste

período que as reações entre a cal, a água e o solo, não ocorreram totalmente, não atingindo no período de tempo a elevação da resistência esperada devido à velocidade das reações cimentantes ocorrerem lentamente (AZEVEDO, 2010).

Figura 51 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 7 dias



Fonte: A autora

Em relação aos compósitos peneirados, de maneira geral, ao passo que se adicionou cal hidratada, elevou-se a resistência à compressão, sendo o maior valor de resistência correspondente ao acréscimo de 7% de cal, e o menor à adição de 3% de cal. Os compósitos A3 e A5, entretanto, apresentaram valores de RCS inferiores ao do solo, apesar de mostrarem crescimento de resistência em relação ao compósito A.

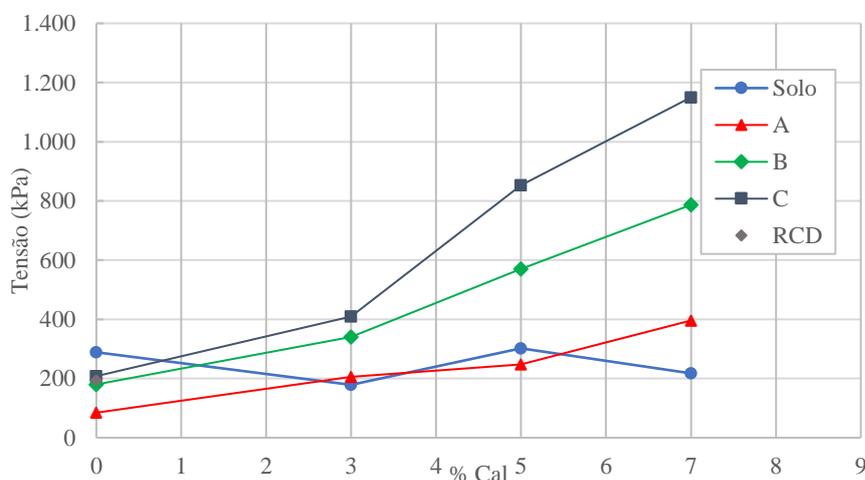
Individualmente, comparando-se as resistências dos compósitos peneirados adicionados de cal com a do solo sem adição, os compósitos B e C, de maiores percentuais de substituição, apresentaram os maiores valores de resistência para o mesmo valor de cal acrescida, sendo o compósito C7 o de maior RCS, que possui aumento de 245%, aproximadamente, em relação ao solo sem adição.

Comportamento semelhante foi encontrado por Samaniego (2015), no qual foi apresentado aumento de resistência com o aumento da dosagem de cal e do tempo de cura. Nos compósitos, tendo em vista o baixo valor de RCS sem adição de cal, constata-se que o acréscimo de cal é determinante na influência do seu comportamento, devendo os dois materiais serem aplicados em conjunto para conferir valores de resistência superiores ao do solo.

Os comportamentos e valores de resistência dos corpos-de-prova aos 28 dias de cura estão apresentados na Figura 52. No que diz respeito ao solo, nota-se que a resistência ficou praticamente inalterada quando se compara à ruptura dos 7 dias de cura, havendo acréscimo da ordem de 14%. Nas misturas solo-cal, os valores de resistência foram inferiores ao do solo sem adição, exceto para a mistura S5, que revelou valor semelhante ao do solo.

Para os compósitos, em relação ao material A, de 20% de substituição de solo, nota-se o mesmo comportamento encontrado aos 7 dias, tendo elevação de resistência com adição de cal, possuindo, contudo, valores inferiores à RCS do solo sem adição, exceto para o compósito A7, que apresentou aumento de 37,18%. Os compósitos B e C mantiveram sua tendência, demonstrando, com a presença de cal, valores superiores de resistência para quaisquer percentuais adicionados, sendo os maiores relativos às maiores dosagens de cal. Nos compósitos B7 e C7 houve acréscimo de 172% e 298%, respectivamente.

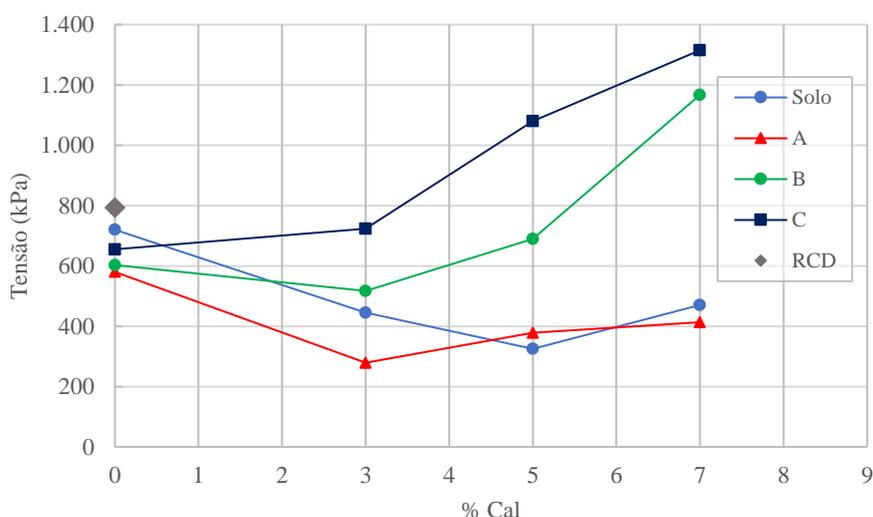
Figura 52 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 28 dias



Fonte: A autora

Aos 120 dias (Figura 53) os materiais sem cal apresentaram os mesmos comportamentos das idades iniciais, tendo os compósitos valores de resistência inferiores ao do solo e do RCD. É válido ressaltar, que nessa idade de ruptura o RCD teve valor de resistência superior ao do solo, com 793 kPa de tensão máxima, enquanto que o solo teve 720 kPa.

Figura 53 - Resistência à compressão das amostras de solo, RCD, compósitos, solo-cal e compósitos-cal aos 120 dias



Fonte: A autora

O aumento da resistência do RCD está relacionado com a sua composição que é formado por diversos agregados e componentes. Estes possuem argilominerais e maiores percentuais, em relação ao solo, de Na_2O , K_2O , que reagem com a cal hidratada, e CaO que contribui para o ganho de resistência, conferindo ao RCD maior ganho percentual de resistência.

Em relação às misturas de solo com cal, verificou-se que a adição de cal, assim como nas demais idades, não contribuiu para o aumento da resistência, tendo as misturas valores inferiores de RCS. Contudo, todos os valores de resistência para um mesmo percentual analisado foi crescente ao longo do tempo, tendo todos os materiais, aos 120 dias, resistências superiores às demais idades de ruptura.

Tal resultado se deve ao fato de o solo ser arenoso siltoso, pois neste tipo de solo, segundo Souza (2014) e Oliveira (2005), nem sempre se desenvolve a resistência almejada com a adição de cal. Para que isso seja modificado, de acordo com Oliveira (2005), deve-se adicionar materiais que permitam o surgimento das reações químicas.

No que diz respeito aos compósitos houve mudança no comportamento. O compósito A quando adicionado de cal apresentou valores de resistência inferiores ao do compósito sem cal, demonstrando que as reações que ocorrem entre a cal e o compósito em questão passam a não ser suficientes para superar o valor de RCS do solo.

No compósito B a tendência de crescimento da resistência com o aumento da dosagem de cal se manteve, no entanto, com mudanças. O compósito B refletiu valores de RCS inferiores ao do solo com a adição de cal, com exceção, porém, do compósito B7, o qual revelou ganho de resistência da ordem de 62,08% em relação ao solo sem substituição e sem adição.

O compósito C, entretanto, demonstrou valores de RCS altos em relação aos demais compósitos e ao solo, inclusive, sendo, dentre os materiais estudados aquele que possui os melhores resultados com a adição de cal. A partir de 5% de adição, cujo percentual é o que estabilizou quimicamente a amostra, a RCS superou o solo em 50,00% para C5, e 82,64% para C7.

O resultado do compósito C é esperado tendo em vista que, por ser o material que possui maior percentual de fração fina do RCD, possui, percentualmente mais componentes oriundos do RCD, como os argilominerais citados anteriormente e partículas cimentícias. E assim sendo, esse compósito possui mais partículas tanto do RCD, quanto do solo, já que o material não foi lavado, e conserva parte de seus argilominerais, o que possibilita maior interação entre os componentes e cal, interferindo positivamente nas reações que proporcionam ganho de resistência.

Os resultados de resistência à compressão simples das amostras ensaiadas estão contidos na Tabela 27. Verifica-se que os valores de RCS dos materiais aumentaram ao longo do tempo, sendo os maiores ganhos relativos aos compósitos sem cal hidratada, tendo o compósito A ganho de 1481,82%, o B, de 686,52%, e o C de 409,07%. Os valores relativos aos compósitos sem adição variaram de 580 kPa a 655 kPa aos 120 dias, sendo o menor deles correspondente ao compósito A e o maior ao C, ambos inferiores à resistência do solo sem adição e à do RCD, cuja RCS é de 793 kPa.

Quanto aos materiais adicionados de cal, aos 120 dias, verifica-se uma variação maior de valores, estando eles na faixa compreendida entre 279 kPa e 1315 kPa, os quais correspondem, respectivamente, ao compósito A3 e C7. Os valores intermediários, localizados entre os dois extremos, são compatíveis com os encontrados por Rajesh e Marimuthu (2015), no estudo de estabilização de um solo arenoso dispersivo com adição de cal.

Na Tabela 27 também são apresentados os valores do módulo secante (E_{50}) dos materiais em todas as idades de rompimento. O solo apresentou módulo de aproximadamente 47,8 MPa, aos

120 dias, valor semelhante ao encontrado por Borges, Freitas e Ferreira (2017) para um solo arenoso siltoso, que foi de 46,3 MPa. O RCD demonstrou valor inferior, com 33,3 MPa, mostrando que este material apresenta maior deformação para um mesmo valor de tensão.

Os valores dos módulos calculados dos materiais originários, ou seja, solo e RCD, tendo em vista que todos os materiais foram moldados e mantidos em câmara úmida sob as mesmas condições iniciais de aceitação dos corpos-de-prova e de umidade, estão relacionados à reação pozolânica ocorrida durante o tempo de cura, oriunda dos seus componentes cimentícios, proporcionando uma alteração na rigidez desses materiais.

Com o tempo de cura, observa-se o aumento dos valores dos módulos para cada material, individualmente, sendo compatível com o aumento da resistência dos materiais ao longo do tempo. Para os compósitos sem cal, verifica-se que o módulo de elasticidade é inferior ao do solo e semelhante ao do RCD. Isso é corroborado pela afirmação de Santos (2018), na qual a adição de agregados reciclados reduz o módulo de elasticidade, quando se compara aos agregados naturais.

Dessa forma, dentre os compósitos, o maior módulo se refere ao compósito C, tendo E_{50} aproximadamente igual ao do RCD, apenas aos 120 dias, de 35,9 MPa. No solo, a adição de cal, em todas as idades provocou uma redução do módulo de elasticidade, sendo os valores reduzidos em relação ao solo em percentuais que variam de, aproximadamente, 33% a 71% aos 120 dias, e o menor valor referente à mistura S5, a qual, dentre as três misturas, é a que demonstrou menor resistência à compressão nesta idade.

A adição de cal hidratada nos compósitos impactou no aumento dos módulos de elasticidade, sendo os valores tanto maiores quanto mais se adicionou cal em um mesmo material, com exceção do compósito A. Assim, para os compósitos B e C com cal, os valores de E_{50} foram maiores, referentes a B7 e C7, com 48,2 MPa e 46,9 MPa, respectivamente. Dessa forma, esses compósitos apresentaram rigidez semelhante à do solo, sendo seus valores muito próximos. Tal comportamento está relacionado à presença de componentes cimentícios, presentes no RCD, os quais tem sua ação potencializada pela aplicação de cal.

Tabela 27 - Valores de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade inicial das amostras ensaiadas aos 7, 28 e 120 dias de cura

Amostra	σ (kPa)	E_{50} (MPa)	σ (kPa)	E_{50} (MPa)	σ (kPa)	E_{50} (MPa)
	7 Dias		28 Dias		120 Dias	
RCD	133	7,8	194	8,4	793	33,3
Solo	254	10,2	289	13,1	765	47,8
S3	116	4,3	179	7,5	445	31,8
S5	194	9,9	302	12,5	325	13,9
S7	206	7,5	218	11,1	470	25,8
A	37	2,3	85	4,1	580	35,8
A3	178	12,7	206	11,4	279	13,9
A5	241	13,4	248	15,3	378	21,9
A7	272	13,6	396	22,2	413	22,7
B	77	3,2	180	6,4	603	33,9
B3	301	12,5	340	16,7	517	23,7
B5	507	22,0	570	25,9	690	32,9
B7	687	28,4	787	28,1	1167	48,2
C	129	5,4	208	6,5	655	35,9
C3	324	13,5	409	16,4	723	32,9
C5	613	34,5	853	30,0	1080	45,4
C7	877	31,1	1150	41,1	1315	46,9

Fonte: A autora

5.12 Análise estatística dos valores de RCS (Critério de Chauvenet)

Os valores de resistência à compressão simples de cada corpo-de-prova foram analisados pelo critério de Chauvenet, conforme utilizado por Araújo, Guimarães e Geyer (2016), a fim de verificar se existe algum dado discrepante e se os valores representam a média adotada. Para isso, foram calculados os valores de média e desvio padrão de cada material, nas diferentes idades de rompimento, cujos resultados estão contidos no Apêndice C.

Para identificação dos possíveis dos valores de RCS dos materiais, calculou-se a razão entre o desvio absoluto de cada corpo-de-prova e o respectivo desvio padrão, obtendo-se o índice ΔR , cujo valor aponta para a verificação da normalidade das resistências individuais, e portanto, demonstra se a quantidade de amostras utilizadas foi suficiente para representar a média.

Como comparativo, baseado em FEM-UNICAMP (2017), foi escolhido o valor de $\Delta R_0=1,38$, pois é o valor que está relacionado com a quantidade de corpos-de-prova de cada tipo de material, ou seja, três por material, e por idade. Na Tabela 28 são apresentados os valores de ΔR calculados para cada corpo-de-prova ensaiado, estando as planilhas referentes aos cálculos presentes no Apêndice C.

É possível verificar que dentre os 17 materiais analisados, para todos os corpos-de-prova, nas três idades de rompimento, todos os valores de ΔR foram menores que o valor de ΔR_0 , sendo os valores de resistência à compressão simples das amostras ensaiadas considerados como representativos da média, pois a variação individual da RCS está dentro do aceitável. Assim, o número de corpos-de-prova adotados para cada idade de rompimento foi considerado como satisfatório.

Tabela 28 - Valores de ΔR dos corpos-de-prova ensaiados

Amostra	Valores de ΔR_0								
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
	Tempo de cura - 7 dias			Tempo de cura - 28 dias			Tempo de cura - 120 dias		
RCD	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,58	1,15	0,58
Solo	0,72	1,14	0,42	0,48	0,67	1,15	0,87	0,87	0,87
S3	0,00	0,00	0,00	0,24	0,86	1,1	0,71	0,00	0,71
S5	0,00	1,00	1,00	0,76	0,38	1,13	0,71	0,71	0,00
S7	0,29	0,82	1,11	0,83	0,28	1,11	0,00	1,00	1,00
A	0,58	0,58	1,15	0,92	0,14	1,06	1,07	0,91	0,15
A3	0,33	1,12	0,79	1,13	0,38	0,76	0,7	0,45	1,15
A5	0,17	1,08	0,90	1,00	0,00	1,00	0,41	0,73	1,14
A7	0,92	0,14	1,06	0,53	1,15	0,62	0,97	1,02	0,05
B	0,58	1,15	0,58	0,28	1,11	0,83	0,39	1,14	0,74
B3	0,99	0,02	1,01	1,15	0,51	0,64	1,09	0,22	0,87
B5	0,58	0,58	1,15	1,15	0,69	0,46	0,83	0,28	1,11
B7	0,58	0,58	1,15	0,32	0,80	1,12	0,58	1,15	0,58
C	0,84	0,26	1,10	0,98	0,04	1,02	0,71	0,71	0,00
C3	0,00	0,71	0,71	0,99	1,01	0,02	0,8	1,12	0,32
C5	1,15	0,58	0,58	0,22	0,87	1,09	0,58	1,15	0,58
C7	1,03	0,97	0,07	0,22	0,87	1,09	0,18	1,35	0,76

Fonte: A autora

5.13 Análise de componentes principais

Para obtenção do número de componentes e análise das variâncias individuais e acumuladas, calculou-se os escores. Em relação à resistência à compressão, os escores foram obtidos de acordo com Lafayette (2006), enquanto que para as demais variáveis, admitiu-se os valores originais como sendo o dos escores, pois apresentam valores fixos.

De posse dessas informações, calculou-se no software Statística 10.0 os autovalores e variâncias que definem a quantidade de componentes principais (Tabela 29). Com a Tabela 29, verifica-se que com quatro componentes é obtida uma variância acumulada de 100%, o que significa que essa quantidade de componentes explica todas as relações entre as cinco variáveis estudadas.

Entretanto, de acordo com Hongyu, Sandanielo e Junior (2016) e Varella (2008), não é necessário estudar todas as componentes calculadas, devendo ser utilizadas aquelas que possuem variância acumulada de pelo menos 70%, cujo percentual é obtido com a representação dos autovalores individuais em relação ao somatório dos autovalores de todas as componentes.

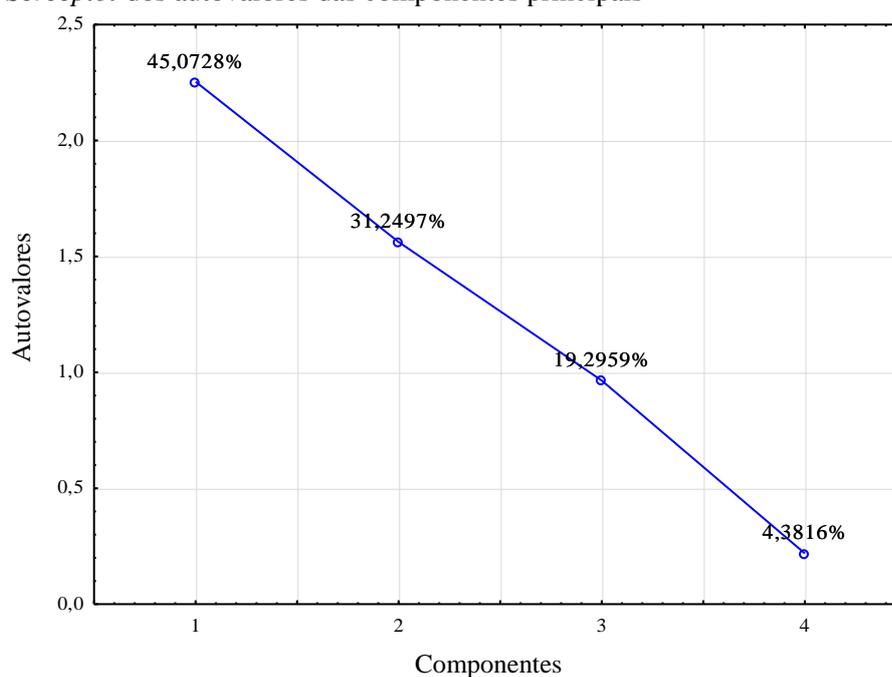
Tabela 29 - Autovalores e variâncias relacionadas as variáveis de estudo

Componente	Autovalores	Variância individual (%)	Autovalores cumulativos	Variância cumulativa (%)
1	2,25	45,07	2,25	45,07
2	1,56	31,25	3,82	76,32
3	0,96	19,30	4,78	95,62
4	0,22	4,38	5,00	100,00

Fonte: A autora

No que se refere a componente 1, observa-se um valor percentual de 45,07% em relação à variância, enquanto que a componente 2 possui variância de 31,25%. Dessa forma, afirma-se que as duas componentes são representativas no estudo do conjunto de dados, e quando analisadas em conjunto refletem de forma efetiva a variância amostral total dos dados. Tendo em vista essa representatividade, foram utilizados as componentes 1 e 2 para análise dos dados, totalizando 76,32% da variância amostral (Figura 54).

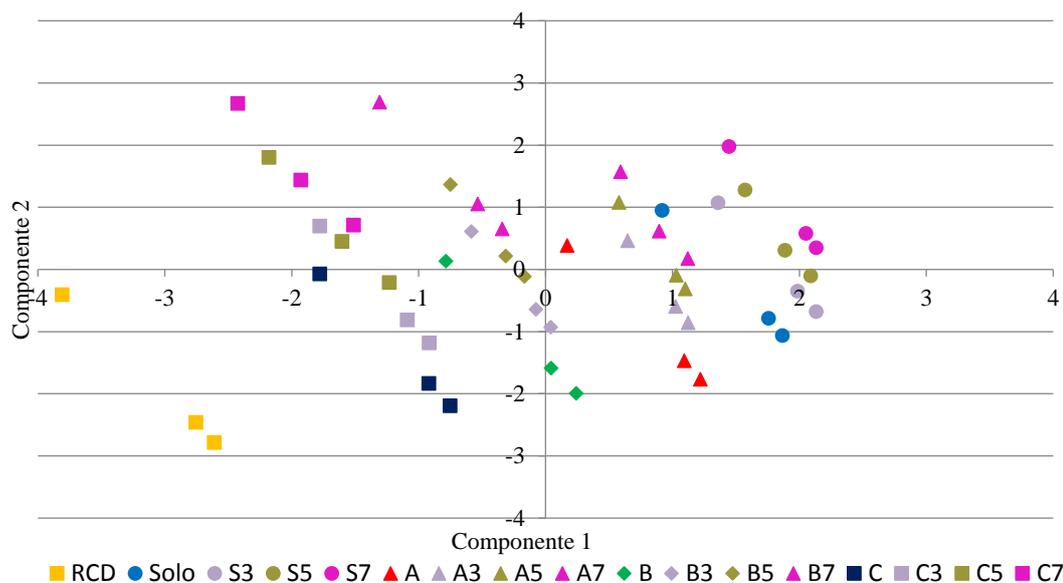
Figura 54 - *Screeplot* dos autovalores das componentes principais



Fonte: A autora

Tendo definido os componentes de utilização, calculou-se com o mesmo software os escores de cada componente. Para cada valor correspondente da associação das variáveis, ou seja, para cada corpo-de-prova, foi obtido um par ordenado de escore, onde o eixo X corresponde à componente 1 e o eixo Y à 2, conforme mostrado na Figura 55.

Figura 55 – Escores individuais em função das componentes principais



Fonte: A autora

Contudo, por meio da análises dos escores, observa-se que as relações que as variáveis apresentam não são conclusivas, tendo em vista que não são demonstradas as ações individuais de cada variável em relação às suas componentes. Sendo assim, conforme Rocha e Pereira (2015), utilizou-se os pesos fatoriais ou loadings (Tabela 30), que indicam as contribuições individuais das variáveis nas componentes, as quais tem como base os escores dos pares ordenados da Figura 55.

A relação das variáveis com as componentes quantificadas na Tabela 30, são apresentadas na Figura 56. Em relação à componente 1, verifica-se que a quantidade de solo tem maior peso positivo, enquanto que o percentual de RCD tem maior peso negativo, demonstrando que eles apresentam relação oposta com a componente em questão, ou seja, a medida que se aumenta a substituição de RCD, reduz-se a quantidade de solo, sendo compatível com as misturas realizadas.

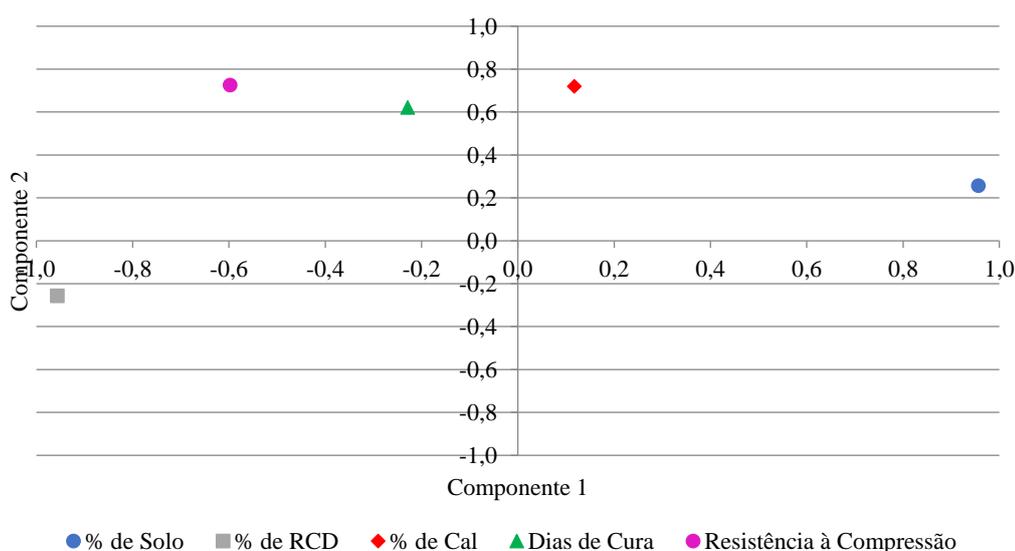
Tabela 30 - Loadings das variáveis em relação às componentes principais

Variável	Componente 1	Componente 2
% de Solo	0,956604	0,256905
% de RCD	-0,956604	-0,256905
% de Cal	0,117727	0,718999
Dias de Cura	-0,228820	0,621705
Resistência à Compressão	-0,597698	0,725953

Fonte: A autora

No que se refere à componente 2, nota-se que a quantidade de cal hidratada, a quantidade de dias de cura dos corpos-de-prova e a resistência à compressão, tem maior peso sobre a componente, que explica 31,25% da variância amostral. Contudo, de forma geral, quando se analisa a relação das variáveis com as duas componentes, de maneira simultânea, há uma conclusão mais efetiva sobre os efeitos que elas provocam, que corrobora os resultados encontrados de resistência.

Por meio da Figura 56 é possível observar que a resistência à compressão possui maior relação com a quantidade de dias de cura, para as idades analisadas. A quantidade de cal demonstra influência sobre essas duas variáveis, ainda que em menor intensidade, pois, a variável se apresenta próxima às suas coordenadas, contudo em lados opostos.

Figura 56 - Relação das variáveis com as componentes

Fonte: A autora

A cal hidratada e o solo demonstram que exercem influência entre si, visto que estão na região positiva das componentes 1 e 2, com ângulo agudo formado entre os vetores de suas posições. Quanto ao solo e ao RCD, é permanente o comportamento de oposição, demonstrando que o RCD age de maneira oposta em relação às características que o solo promove.

De forma complementar, verifica-se que o RCD se encontra também em posição contrária à resistência à compressão, não agindo de maneira significativa para o aumento do seu resultado. Essa informação é compatível, pois, a substituição de solo por RCD, em sua fração fina, não elevou a resistência quando se compara ao solo, isoladamente.

Sendo assim, a análise das componentes principais evidencia que para que a resistência à compressão seja elevada, é preciso que se aplique a cal, sendo às suas propriedades cimentantes verificadas ao longo do tempo, a qual é crescente com o aumento do tempo de cura. Entretanto, para que isso ocorra, é necessário dosar o percentual de solo e RCD da mistura, pois a parcela de RCD utilizada age de forma oposta em relação ao solo, devendo haver uma proporção que faça um equilíbrio adequado das características desejadas.

6 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos com a realização dos ensaios laboratoriais foram obtidas algumas conclusões, tanto no que diz respeito aos materiais individuais, quanto nas misturas avaliadas, conforme mostrado abaixo.

O solo de estudo foi enquadrado na classificação de dispersividade de grau 3 a 4, com a realização do *Crumb Test*, apontando para uma forte possibilidade de uma característica dispersiva. No entanto, a realização de outros ensaios foi necessária para atestar o comportamento demonstrado por este ensaio de erodibilidade. No ensaio sedimentométrico comparativo a característica dispersiva foi reiterada, bem como no ensaio do *Pinhole Test*, o qual apontou para um solo de caráter dispersivo.

A análise granulométrica do solo, RCD e compósitos com e sem peneiramento permitiu definir a distribuição das frações de cada material, sendo verificado que para todos, a maior porção é aquela referente à areia. Nos compósitos, verificou-se que maiores percentuais de substituição implicam em aumento da fração fina, sendo o maior deles o da fração de silte, no compósito C.

Segundo o SUCS, o solo foi classificado como uma areia siltosa (SM), enquanto que os resíduos foram enquadrados como uma areia bem graduada (SW). A inserção de resíduos no solo não modificou a sua classificação, sendo mantidos, nos três percentuais utilizados, a classificação de areia siltosa, para todos os compósitos. Os valores de limites de Atterberg estudados para estas amostras indicaram que os materiais não apresentaram limites de liquidez e de plasticidade, comportando-se, portanto, como materiais não plásticos.

Os valores de densidade real dos grãos de solo e de RCD demonstraram semelhança entre os materiais, por serem muito próximos. A substituição de solo por RCD, nos compósitos não peneirados, e de fração de solo, nos compósitos peneirados, não alterou significativamente os valores de densidade média.

Por meio da avaliação do pH do solo e dos compósitos junto à adição de cal hidratada, determinou-se que a partir de 5% de cal o pH se mantém, indicando que os materiais se estabilizam a partir deste percentual. Porém foram testados os percentuais de 3%, 5% e 7% a fim de observar como os diferentes percentuais influenciam a dispersividade e o

comportamento mecânico. Todos os materiais foram classificados como alcalinos, sendo verificado que para um mesmo percentual de cal, quanto menor a quantidade de RCD, mais básica é a amostra.

No que condiz à dispersividade, verificou-se, com o *Pinhole Test*, que quando se trata de compósitos sem peneiramento, apenas a partir de 40% se evidencia eliminação de dispersividade, enquanto que nos compósitos peneirados, quaisquer percentuais substituídos implicam em um material não dispersivo, sendo a estabilização granulométrica adequada para a eliminação do caráter dispersivo do solo. Contudo, o compósito C (60% de RCD) apresentou indícios de erosão mecânica.

Em relação a adição de cal, verifica-se no solo eliminação da dispersividade, assim como nos compósitos peneirados, sendo os melhores resultados encontrados para os compósitos B e C. No entanto, a utilização da cal demanda cuidados e eleva o custo da estabilização, tendo em vista a necessidade de transporte desse material para o local de origem do solo.

Referente à unidade ótima, ao passo que se substituiu solo por RCD, houve acréscimo. Tal comportamento foi verificado também para as adições de cal hidratada em todas as misturas analisadas, sendo o valor tanto maior, ao passo que se aplicou uma maior quantidade de cal. A densidade seca máxima, no entanto, seguiu o sentido oposto, sendo tanto menor quanto se adicionou RCD e cal.

Quanto à resistência à compressão simples, os resultados indicam, de forma geral, que a substituição de solo por RCD, junto com a cal, proporciona ganhos de resistência nos compósitos, sendo os valores crescentes com o aumento das quantidades de RCD e cal, com ganhos de até 82% em relação ao solo. Quanto ao uso do RCD isoladamente, a substituição não representou ganhos significativos, sendo o compósito de 60% de RCD, o de maior resistência dentre os compósitos peneirados.

Os módulos de elasticidade secante (E_{50}) do solo e do RCD são superiores aos dos compósitos sem cal, e se devem à ação pozolânica dos componentes presentes em sua estrutura. Em relação à utilização da cal nos compósitos peneirados, verifica-se que é possível obter um valor de E_{50} próximo ao dos materiais originários, entretanto, deve-se utilizar a partir de 7% de cal. Os maiores módulos dentre os compósitos com cal se referem àqueles com 40% e 60% de RCD

substituído, sendo o aumento dos seus valores ligados à presença de componentes cimentícios, oriundos do RCD.

A análise estatística evidencia que para avaliação da RCS, o número de três corpos-de-prova é suficiente para representar o valor médio de resistência. A análise de componentes principais reflete o comportamento dos resultados de RCS obtidos, demonstrando que para que se eleve a RCS é preciso equilibrar a quantidade de RCD e solo utilizada, junto à cal, e submeter a amostra ao maior tempo de cura possível.

De acordo com os resultados de dispersividade e resistência, infere-se que é viável substituir a parcela de solo ligada à dispersividade, por RCD, com uma quantidade mínima de cal hidratada, sendo os compósitos peneirados de 40% de RCD com 5% de cal, e de 60% de RCD com 5% e 7%, as composições de melhores resultados, pois houve elevação do valor da resistência sem comprometer a erodibilidade.

Sendo assim, verifica-se que é possível aliar a necessidade de obter uma outra forma de aplicação para os resíduos oriundos da construção civil, conferindo-lhes uma destinação correta, contribuindo ainda para a melhoria do caráter dispersivo de um solo, o qual torna-se viável para diversas utilizações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (CPRH). **Diagnóstico socioambiental do litoral norte de Pernambuco: o meio físico da área**. 2001. Disponível em:< http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/23_Vegetacao_e_Fauna.pdf >. Acesso em:: 17 jul. 2018.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **Monitoramento Pluviométrico**. 2017. Disponível em:< <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

AITCHISON, G. D.; INGLES, O. G.; WOOD, C. C. Post-Constructin Deflocculation as a Contributory in the Failure of Earth Dams. In: Australian-New Zealand Conference on SMFE, 4. 1963, Australia. **Anais...**, Australia, 1963, p. 275-279.

ALMEIDA, J; ROSA, F. D.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; BRUM, E. M.; MASTINS, M. S. Estudo da viabilidade econômica do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. **Revista de Engenharia Civil**, Passo Fundo, v. 1, n. 54, p. 16-25, 2018.

ALMEIDA; T. L. M. **Sedimentologia e batimetria da plataforma interna adjacente à Ilha de Itamaracá**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual book of ASTM standards**. Section 4: Construction, v.04: Soil and rock; dimension stone; geosynthetics. Philadelphia, 1990.

ARAÚJO, N. N., **Desempenho de argamassas de revestimentos produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da Grande Natal-RN**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influência do tipo de concreto, da dimensão do corpo de prova e do tipo de laboratório na determinação da resistência à compressão do concreto. **Revista Engenharia Civil**, [S.I.], n. 52, p. 5 – 22, 2016.

ARRIVABENI, B. S. **Alternativas para estabilização granulométrica e química do solo de estradas florestais**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

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

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **NBR 6473: cal virgem e cal hidratada – Análise química**. Rio de Janeiro, 2003a.

- _____. **NBR 6502:** Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003b.
- _____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2017b.
- _____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017c.
- _____. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 9289:** Cal hidratada para argamassas – determinação da finura. Rio de Janeiro, 1998a.
- _____. **NBR 9290:** Cal hidratada para argamassas – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1996a.
- _____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. **NBR 12770:** Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 13601:** Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*). Rio de Janeiro, 1996b.
- _____. **NBR 13602:** Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 1996c.
- _____. **NBR 14114:** Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (*pinhole test*). Rio de Janeiro, 1998b.
- _____. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.
- _____. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.
- _____. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil– Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.
- _____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.
- _____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004f.

ATTUX, ROMIS. **Tópico 6 – Propriedades Mecânicas**. 2017. Disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~attux/topico6.pdf>. Acesso em: 13 nov. de 2018.

AVILA, L. O. **Erosão na microbacia do Arroio Sarandi: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

AZEVEDO, A. L. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BANCO DE DADOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO (BDE). **História municipal da Ilha de Itamaracá**. 2006. Disponível em: http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/VISUALIZACAO_FORMATO2.ASPX?COD=1&codPermissao=&codFormatacao=745&codInformacao=915. Acesso em: 17 jul. 2018.

BARROS, L. C.; VALENÇA, L. M. M.; MANSO, V. A. V.; FILHO, J. D. N.; OLIVEIRA, J. A. R. Textura, composição e arredondamento dos sedimentos da plataforma continental interna adjacente às desembocaduras sul do canal de Santa Cruz e do Rio Timbó, norte do Estado de Pernambuco. **Estudos ecológicos**, Recife, v.17, n. 1, p. 58 – 70, 2007.

BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedreira de uma rocha granítica**. 2007. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BEZERRA, J. S. **Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus – Ilha de Itamaracá/PE**. 2018. Seminário do Exame de Qualificação (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BORDIGNON, V. R.; PUPPI, R. F. K.; IZZO, R. L. S.; JOHANN, A. D. R. Estudo da viabilidade tecnológica do emprego de cal em um solo da formação guabirota para fins de pavimentação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 1-9.

BORGES, J. J. S.; FREITAS, M. L. R. A.; FERREIRA, S. R. M. F. Variação do módulo de elasticidade de um solo colapsível de Petrolina-PE com e sem inundação. **Revista Matéria**, Recife, suplemento, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

_____. **Resolução nº 348**, de 16 de agosto de 2004. Altera a resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Brasília, 2004.

_____. **Resolução nº 431**, de 24 de maio de 2011. Altera o artigo 3 da resolução nº 307 de 5 de julho de 2002 do CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, 2011.

_____. **Resolução nº 469**, de 29 de julho de 2015. Altera a resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2015.

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

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 171 – 192, 2008.

CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila e atributos físicos de um Argissolo em curvaturas de relevo**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. L.; MACIEL, G. F. Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Matéria**, [S.I.], v. 23, n. 1, p. 1-20, 2018.

CANDIDO, J. J. **Turismo e impactos socioambientais: uma proposta de gestão pública sob o prisma da sustentabilidade para a Ilha de Itamaracá – Pernambuco**. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

CARMO, D. C. **Fundação sobre solo melhorado com cimento: estudo de caso do bloco de sala de aula do curso de engenharia civil**. 2015. 58 f. Trabalho (conclusão de curso) - Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2015.

CARVALHO, A. V.; CARVALHO, A. C.; CARVALHO, D. F.; FILGUEIRAS, G. C.; ARAÚJO, A. C. S.; SOARES, A. A. S. Arranjos produtivos locais de agricultura temporária no estado do Pará: uma aplicação do modelo de análise de componentes principais. **Agrossistemas**, Belém, v. 9, n. 2, p. 19 – 42, 2017.

CARVALHO, M. V. **Influência do reuso de amostras no ensaio de compactação de dois latossolos de Minas Gerais**. 2017. 38 f. Trabalho (conclusão de curso) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CHEROBIN, S. F. **Estimativa de erosão e sua relação com os diferentes mecanismos erosivos atuantes: estudo da voçoroca de Vista Alegre**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CHOOBBASTI A. J.; KUTANAEI S. S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Iran, v. 3, n. 4, p. 1 – 8, 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. 2014 a. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16771>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapa geológico folha Itamaracá SB.25-Y-C-VI – Escala 1:100000**. 2014 b. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17760/3/folha_itamaraca.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do Estado de Pernambuco: diagnóstico do município de Ilha de Itamaracá**. 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16285/Rel_Ilha%20de%20Itamarac%C3%A1.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 jul. 2018.

COMPANHIA HIDRELÉTRICA DE SÃO PAULO (CESP). **Métodos de ensaios de erodibilidade em solos: pinhole test, porcentagem de dispersão e ensaios de turbidez**. Ilha Solteira, SP: Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP, 1983. 34 p.

CONDEPE/FIDEM. **Calendário Oficial de Datas Históricas dos Municípios de Pernambuco. 2006**. Disponível em: <http://www.condepefidem.pe.gov.br/c/document_library/get_file?p_1_id=18393234&folderId=18394117&name=DLFE-89576.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2018.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; SILVA, G.A.C.; GREGORIO, G.C.; SOUZA, A.E.; SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, Spain, n.123, p. 594 – 600, 2016.

CORRÊA, J. F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COSTA, V. P. **Caracterização geotécnica do resíduo da lavra de pegmatitos graníticos granulometricamente reduzidos**. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

COUTO, L. A. F. A. H. R. **Caracterização geotécnica de areia reciclada produzida a partir de resíduos de construção e demolição do município de Natal/RN**. 2017. 19 f. Trabalho (Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CRUZ, S. I. C. **Caracterização e utilização de solos dispersivos nos aterros compactados da barragem de Sobradinho**. 2008. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 160/2012: Solos – Determinação da expansibilidade – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (DNIT) **Manual de Pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro, 2006.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. In: Highway Research Record, 139., 1966, Washington. **Anais...** Washington, 1966, p. 61-72.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Embrapa solos UEP Recife**. 2006. Disponível em < www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html >. Acesso em: 17 jul. 2018.

_____. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017. 575 p.

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – FEM-UNICAMP. 2017. **Critério de Chauvenet**. Disponível em: < http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Criterio_Chauvenet.doc >. Acesso em: 13 nov. 2018.

FAGUNDES, W. C. **Estimativa do fator de carga (fc) e fator de demanda (fd) de consumidores de energia elétrica via medição e pesquisa de posses e hábitos**. 2011. 156 f. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

FARIAS, A. B. **Análise técnica e econômica de resíduos da construção e demolição aplicados em pavimentação**. 2013. 183 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). **A indústria mineral paulista: síntese setorial do mercado produtor**. São Paulo, 2017. Disponível em: < http://az545403.vo.msecnd.net/observatoriodaconstrucao/2017/04/a_industria_mineral_paulista.pdf >. Acesso em: 22 mai. 2018.

FERREIRA, S. R. M. Colapsibilidade de um solo e seus aspectos relevantes. **Revista de Ciência & Tecnologia**, [S.I.], v.2, p.119 - 136, 1999.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Revista matéria**, Recife, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2017.

FIGUEIREDO, S. S. **Estudo da durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil**. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

FUJI, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias**. 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

FUJI, L. M. T.; CARVALHO, J. C. Comportamento mecânico de misturas com resíduo de construção e demolição de concreto, cal virgem e hidratada e solo tropical. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17., 2014, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2014, p. 1-6.

GANDOLFI, G. G.; CARDOSO, L. S. **Estudo de estabilização química do tipo solo-emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação**. 2013. 84 f. Trabalho (conclusão de curso) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GARCIA, M. F. S. **Mineralogia de solos e sedimentos do grupo barreiras do litoral norte da bahia**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GOODARZI, A. R.; SALIMI, M.; Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag. **Applied Clay Science**, Iran, v. 108, p. 61 – 69, 2015.

GOULART, C. G. P.; MARÇAL, G. S.; NASCIMENTO, M. C.; RAMOS, R. C.; MARINHO, R. S.; PITANGA, H. N. Estudo do comportamento mecânico de misturas solo-resíduo compactadas a diferentes energias. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 2-8.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002. 341 p.

HADDAD, A.; JAVDANIAN, H.; EBRHIMPOUR, F. Identification and Stabilization of Dispersive Soils: Case Study of Water Transfer Canal of Simindasht-Garmsar. **Journal of Engineering Geology**, Spring, v. 11, n. 1, p. 29-50, 2017.

HAMMES, R. F.; VIER, L. C.; ROSSI, C. T.; DOS SANTOS, R. R.; DA SILVA, J. M.; BOCK, A. L. Ensaio de caracterização do solo de RCD da região noroeste do RS. In: Seminário de Iniciação Científica, 25., 2017, Rio Grande do Sul. **Anais...** Rio Grande do Sul, 2017, p. 1-5.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, [S.I.], v. 1, n. 5, p. 83 – 90, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <

<https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260760>>. Acesso em: 31 out. 2017.

_____. **Ilha de Itamaracá**. 2017. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/ilha-de-itamaraca/panorama>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

_____. **Ilha de Itamaracá – PE: histórico**. 2018. Disponível em:< <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/dtbs/pernambuco/ilhadeitamaraca.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação.** 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

KIST, K. J.; BARTH, A. A.; LIMANA, L. REICHERT, L. S. Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como substituição da matéria prima natural em base, sub-base e subleito de pavimentações. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 28., 2017, Ijuí. **Anais...** Ijuí, 2017, p. 1-5.

KLEIN, F. B.; GONÇALVES DIAS, S. L. F. A deposição irregular de resíduos da construção civil no município de São Paulo: um estudo a partir dos instrumentos de políticas públicas ambientais. **Revista Desenvolvimento e Ambiente**, Paraná, v. 40, p. 483-506, 2017.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no parque metropolitano Armando Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE.** 2006. 391 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B. ; COUTINHO, R. Q. . Resistência à erosão em ravinas em latossolo argilo arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, [S.I.], v. 35, p. 2167-2174, 2011.

LEITE, C. A. V. G.; NETO, T. F. P.; AGUIAR, M. F. P.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise de melhoramento de solo com brita e resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do Ceará. **Conexões: Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 10, p. 17 – 23, 2016.

LEITE, I. C. A.; DAMASCENO, J. L. C.; REIS, A. M.; ALVIM, M. Gestão de resíduos na construção civil: um estudo em Belo Horizonte e Região Metropolitana. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 159-175, 2018.

LIMA, C. S. T. **Caracterização tecnológica de resíduos de escavação de estaca tipo hélice contínua para uso em pavimentação.** 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

LIMA, J. P.; GONÇALVES, R. M.; SCHMIDT, M. A. R. Avaliação da eficácia do gerenciamento costeiro integrado utilizando AHP (Analytic Hierachy Process) para a Ilha de Itamaracá, Pernambuco, Brasil. **Gociências**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 743 – 753, 2017.

LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, Feira de Santana, v. 2, p. 53-57, 2012.

LUCENA, L. C. L.; SILVA, J. A.; FILHO, P. G. T. M.; PORTELA, M. G. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de ETA e ETE. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 10, n. 3, p. 873 – 890, 2017.

MACEDO, M. C. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição.** 2016. 123 f. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação**. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.

MACHADO, L. F. M.; CAVALCANTE, E. H.; ALBUQUERQUE, F. S.; SALES, A. T. C. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Revista Matéria**, [S. I.], v. 22, n. 03, p. 5, 2017.

MAIA, C. L. **Uso da escória de aciaria para estabilização granulométrica de solos**. 2014. 89 f. Trabalho (conclusão de curso) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2014.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação**. Juiz de Fora, 2009. Disponível em: < <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo1.pdf> >. Acesso em: 01 out. 2017.

MARTINS, L. C. C. **Melhoria do solo laterítico de Brasília com adição da fração fina de resíduo de construção e demolição reciclado**. 2016. 32 p. Relatório final de iniciação científica – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.

MARTINS, L. N.; FERNANDES, F. F.; CAMPOS, A. M. L. S. Utilização de resíduo de construção e demolição na estabilização do solo de Iranduba para confecção de tijolo de solo-cimento. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 1., 2016, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2016, p. 4-5.

MASCARENHA, M. M. A.; MAHLER, C. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; NACINOVIC, M. G. G.; BANDEIRA, A. P. N.; ALMEIDA, J. G. R. Erosão. In: CARVALHO, J. C. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnica**. 1 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. P. 581-612.

MATUELLA, M. F. **Efeitos da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação**. 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MONTEIRO SILVA, M. F. H. **Resíduos de Construção e Demolição: Estado da Arte 2011/2012**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em ciências e tecnologias do ambiente) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 176 p.

NETO, F. C. S. **Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsíveis**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

OLIVEIRA, L. E. E. **Estudo da matéria orgânica sedimentar como indicador ambiental nas adjacências do porto do Recife, Ilha de Itamaracá e Arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco)**. 2016. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

OLIVEIRA, M. G. M.; LAFAYETTE, K. P. V.; TAVARES, Y. V. P.; SILVA, S. R.; TETI, L. M. E. H.; MACEDO, T. F. Melhoria de solo com resíduos da construção civil reforçado com fibras de propileno. In: Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 4., 2011, Vitória. **Anais...** Vitória, 2011, p. 4-5.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PACHECO-TORGAL, F. Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW). In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.W.Y; LABRINCHA, J.; DING, Y.; DE BRITO, J. **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. 47. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 1-6.

PALACIO, C. H. **Estabilização de solos com resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) para fins rodoviários**. 2014. 30 f. Trabalho (conclusão de curso) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2014.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; DIAS, A. J. G.; CORTES, P. L. Aspectos normativos a respeito dos resíduos de construção civil: uma pesquisa exploratória da situação no Brasil e em Portugal. **Revista Desenvolvimento e Ambiente**, Paraná, v. 9, p. 155-169, 2014.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

PERIUS, G. R.; **Influência das propriedades físicas de agregados reciclados sobre a retração por secagem em concreto auto-adensável**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PERNAMBUCO. **Setur-PE entrega duas obras em Itapissuma e assina ordem de serviço da requalificação da PE 35**. 2013. Disponível em: <<http://www.pe.gov.br/b/6987>> Acesso em: 20 jul. 2018.

PIRES, G. M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos**. 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PIVETTA, C. P.; VENDRUSCOLO, M. A. Análise de solo compactado com resíduo de construção e demolição. In: Seminário de Iniciação Científica, 25., 2017, Rio Grande do Sul. **Anais...** Rio Grande do Sul, 2017, p. 1-5.

PNUD; IPEA; FJP. **Ilha de Itamaracá**. 2010. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/2147>. Acesso em: 20 jul. 2018.

PORTELA, J. C.; CINTRA, F. L. D.; CARVALHO, H. W. L.; ANJOS, J. L.; MELO, P. O. Atributos físico-hídricos e químicos de solos sob cultivo de milho na região agreste de Sergipe. **Agropecuária científica no semiárido**, [S.I.], v.10, n. 1, p. 51 – 58, 2014.

POWERS, M. C. Comparison chart for visual estimation of roundness. **J. Sedim. Petro.**, [S.I.], n. 23, p. 117-119, 1953.

RAJESH, T.; MARIMUTHU, A. Geotechnical Characterization of Dispersive Soil Stabilized with Lime and Palm Oil Fuel Ash. **Journal of civil Engineering and Environmental Technology**, Chennai, v. 2, n. 8, p. 713 – 716, 2015.

REIS, L. R. M.; MATOS, J. M. E. **Utilização de resíduos da construção e demolição na fabricação de tijolos de solo-cimento**. 2017. 94 F. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

RENGASAMY, P.; TAVAKKOLI, E.; MCDONALD, G. K. Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil. **European Journal of soil science**, Australia, v. 67, p. 659 – 665, 2016.

RIGHI, D. P.; KOHLER, L. G.; LIMA, R. C. A.; NETO, A. B. S. S.; MOHAMAD, G. Cobertura verde: um uso sustentável na construção civil. **MIX Sustentável**, Santa Catarina, v. 2, n. 2, p. 29-36, 2016.

ROCHA, C. H. B.; PEREIRA, A. M. Análise multivariada para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Ambiente e água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 176 – 187, 2015.

ROCHA, G. S. **Efeito da cal na resposta mecânica de um solo residual maduro: análise da resistência à compressão não confinada, permeabilidade, compressibilidade e efeito da cura acelerada na resistência mecânica**. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

ROCHA, M. S. F.; LIRA, K. M. H.; SILVA, L. S.; GONZAGA, G. B. M. Produção e descarte de resíduos na construção civil: uma forma de combate ao Aedes Aegypti. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 3, n. 3, p. 185-196, 2016.

SALES, A. T. C.; FILHO, R. S. A. Efeito do pó do resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, 2014.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTOS, D. S. **Diagnóstico da gestão dos resíduos de construção e demolição e seus impactos ambientais no município de Jaboatão dos Guararapes/PE**. 2015. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, F. S.; LUKIANTCHUKI, J. A.; ILDEFONSO, J. S.; DOS REIS, J. H. C. Avaliação do módulo de resiliência de misturas de solo, cal e resíduo de construção e demolição (RCD). In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15., 2015., [S.I.]. **Anais...** [S.I.], 2015, p.1-7.

SANTOS, R. F. **Análise computacional de deformações em estruturas de concreto armado frente à variação do módulo de elasticidade induzida pela utilização de agregados reciclados**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade regional do noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Ijuí, 2018.

- SANTOS, R.M.M. (1997). **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia**. 1997. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- SCARIN, P. B. R., BERNARDES, G. P. Utilização do índice de perda ao fogo para caracterização de perfil de intemperismo de solo residual e de horizontes de deposição do terciário de Taubaté, SP. In Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016, p. 1-6.
- SCARIOT, K. A. L. **Estudo paramétrico da resistência ao cisalhamento de um solo de baixa capacidade de suporte**. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- SHERARD, J. L.; DUNNINGAN, L. P.; DECKER, R. S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, [S.I.], v. 102, p. 287 – 301, 1976.
- SILVA, A. C. **Comportamento hidromecânico de um solo areno-argiloso adicionado com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.
- SILVA, A. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Comportamento de misturas de solo-RCD e solo-pneu submetidas a ensaios de cisalhamento direto. In: Mostra de extensão, inovação e pesquisa, 4., 2017, Recife. **Anais...**, Recife, 2017, p. 345.
- SILVA, C. R. O.; VILELA, F. O. Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado. **Revista Episteme Transversalis**, Volta Redonda, v. 12, n. 1, p. 117-134, 2018.
- SILVA, F. A. N. **Análise do comportamento sedimentológico e hidrodinâmico da desembocadura norte do canal de Santa Cruz – PE**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- SILVA, L. A. **Sedimentologia do canal de Santa Cruz – Ilha de Itamaracá-PE**. 2004. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- SILVA, R. S. **Estudo da influência do tempo de cura em misturas solo-agregado reciclado**. 2017. 83 f. Trabalho (Conclusão de curso) – Instituto Federal de educação, ciência e tecnologia de Sergipe, Aracaju, 2017.
- SILVA, R. T. **Análise experimental da degradação de polímeros flexíveis em escoamentos turbulentos com redução de arraste por injeção de aditivos: efeitos da bomba centrífuga**. 2014. 54 f. Trabalho (Conclusão de curso) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- SOUZA, A. N. S. **Estudo de misturas solo-cal para base de pavimento rodoviário**. 2014. 71 f. Trabalho (Conclusão de Curso) – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Brasília, 2014.

TURKOZ, M.; SAVAS, H.; ACAZ, A.; TOSUN, H. The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. **Applied clay science**, Turkey, n. 101, p. 1 - 9, 2014.

UMESH, T. S.; DINESH, S. V.; SIVAPULLAIAH, P. V. Characterization of dispersive soils. **Materials Sciences and Applications**, India, n. 2, p. 629 – 633, 2011.

UMESHA, T. S.; DINESH, S. V.; SIVAPULLAIAH, P. V. Control of dispersivity of soil using lime and cement. **International Journal of Geology**, India, v. 3, n. 1, p. 8 – 16, 2009.

VACHER, C. A.; RAINE, S.R.; LOCH, R. J. Strategies to reduce tunneling on dispersive mine spoil materials. In: International Soil Conservation Organization Conference, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane, 2004, p. 2.

VAKILI, A.H.; SELAMAT, M. R. B.; AZIZ, H. B. A.; MOJIRI, A.; AHMAD, Z.; SAFARZADEH, M. Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC. **Geoderma**, Malaysia, n. 285, p. 270 – 279, 2017.

VARELA, G. J. A. C. **Influência dos recifes na evolução da linha de costa na Ilha de Itamaracá-PE**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

VARELLA, C. A. V. **Análise de componentes principais – Análise multivariada aplicada às ciências agrárias**. 2008. 12 p. Trabalho de conclusão de curso (Pós graduação) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

VASCONCELOS, I. A. **Avaliação da resistência à compressão simples de um solo natural e tratado com cal para fins de fundação**. 2016. 34 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2016.

VIANA, C. B.; LAFAYETTE, K. P. V. Estudo experimental do emprego do resíduo de Construção e Demolição em Solo-cimento. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 2, nº 1, p. 21-27, 2016.

VIEIRA, C. R. **Análise da geração dos resíduos da construção civil, consumos de água e energia nos canteiros de obra da cidade do Recife-PE**. 2018. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

VILLALBA, N. M. K. **Durabilidade, rigidez e avaliação do ciclo de vida de um solo dispersivo estabilizado com cal**. 2015. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

APÊNDICE A – Ensaio sedimentométrico comparativo (curvas)

Figura 57 - Curvas granulométricas do RCD

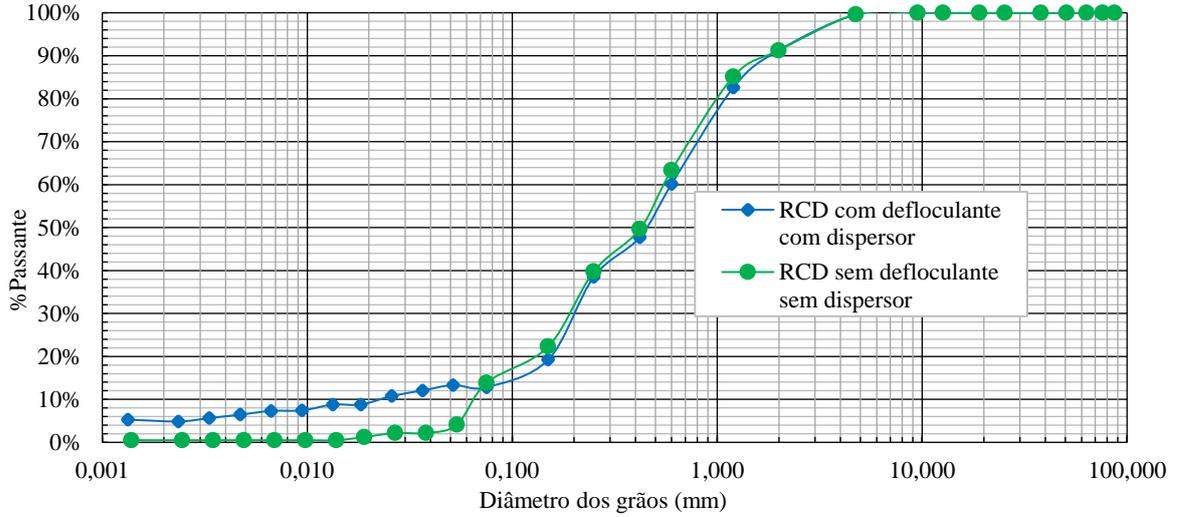


Figura 58 - Curvas granulométricas do composto A

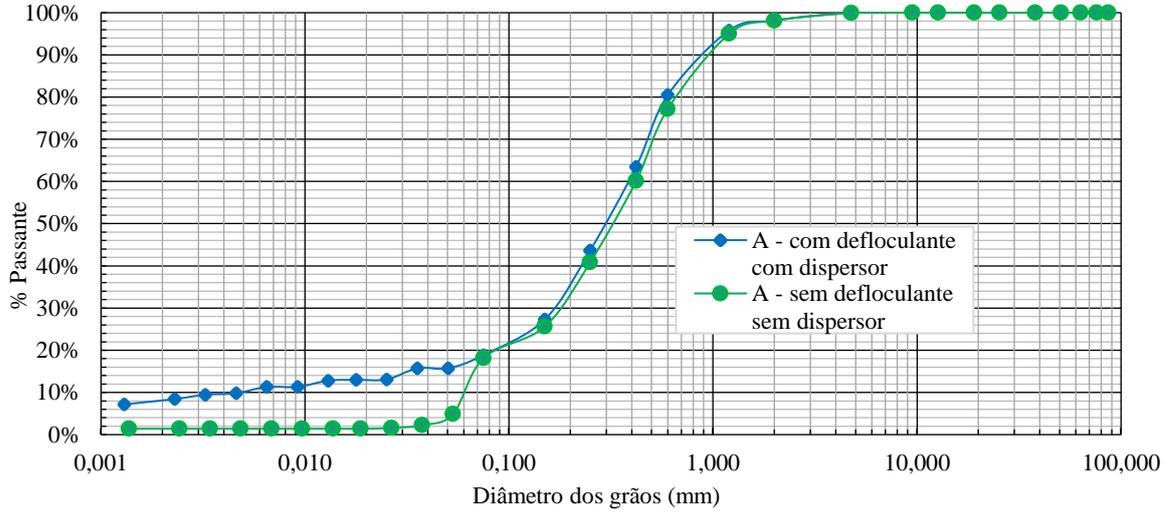


Figura 59 - Curvas granulométricas do composto B

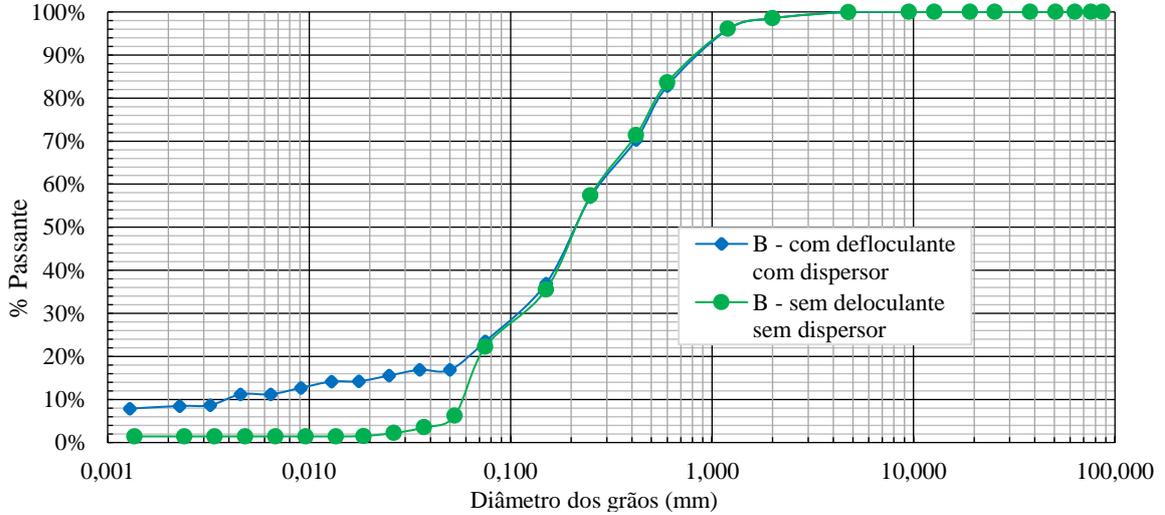


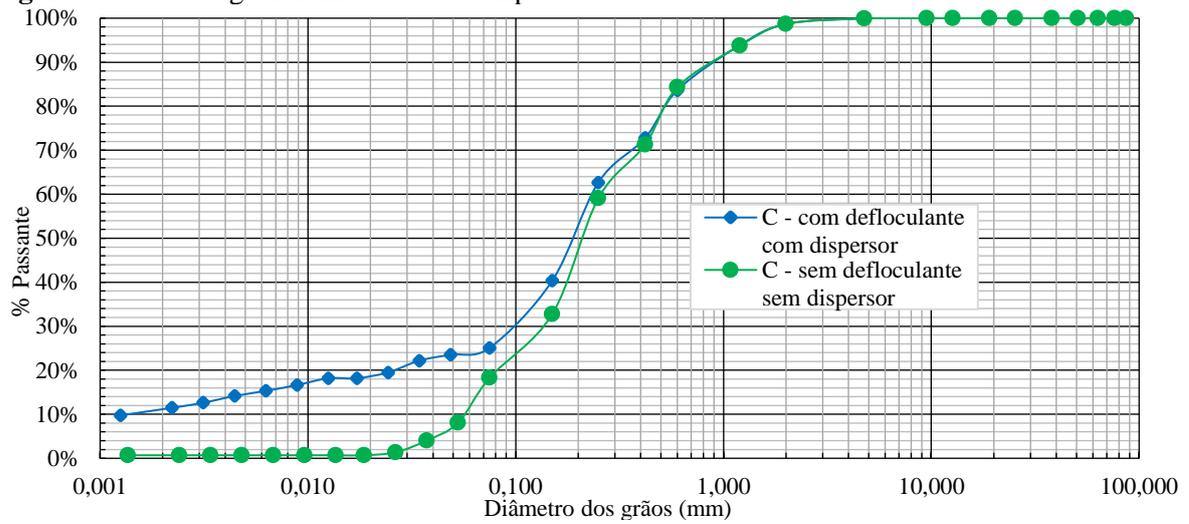
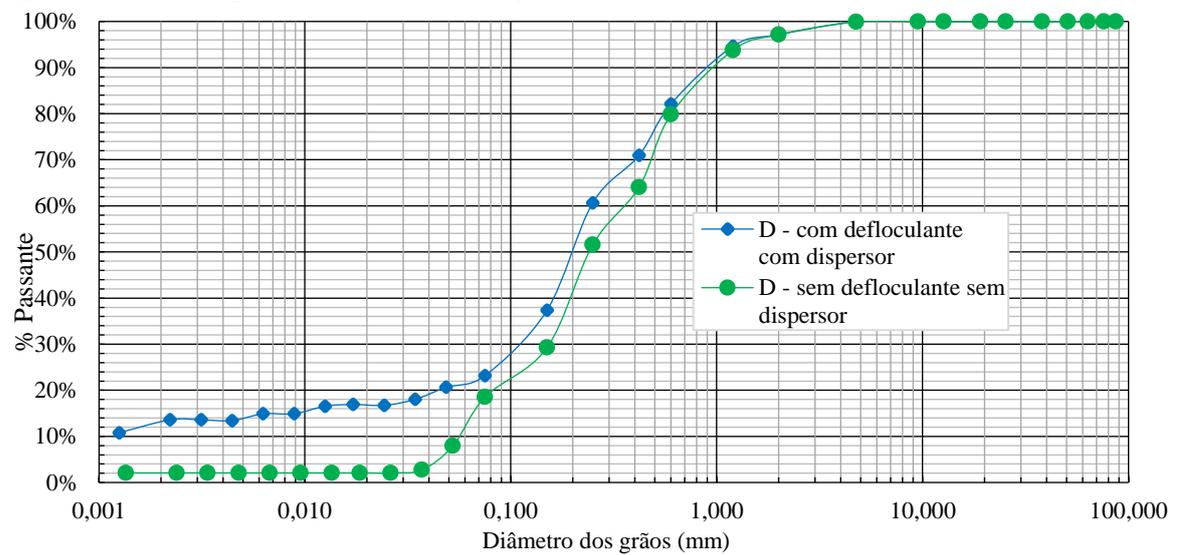
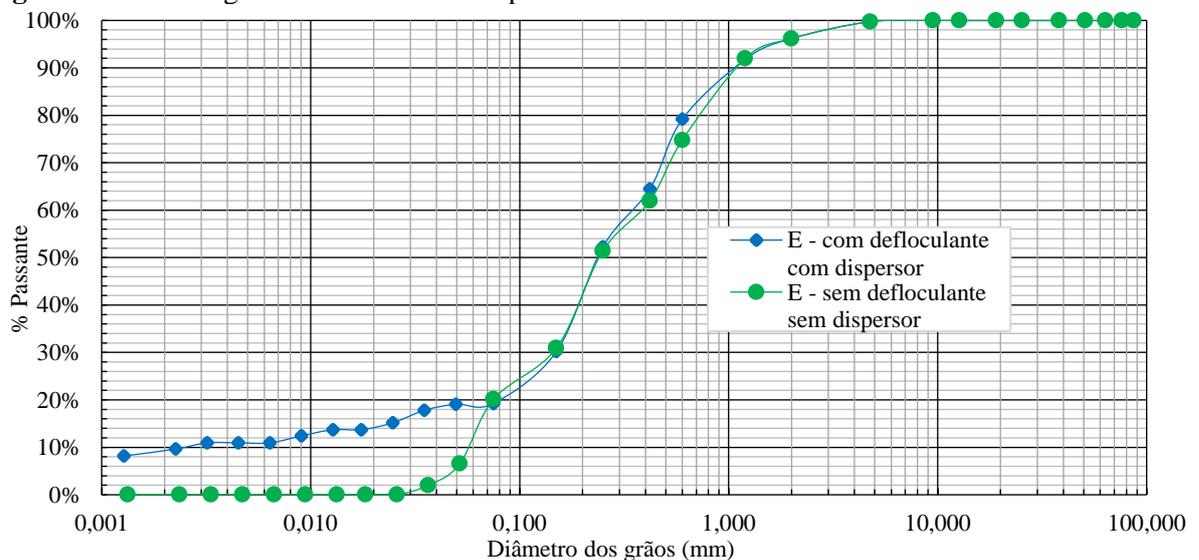
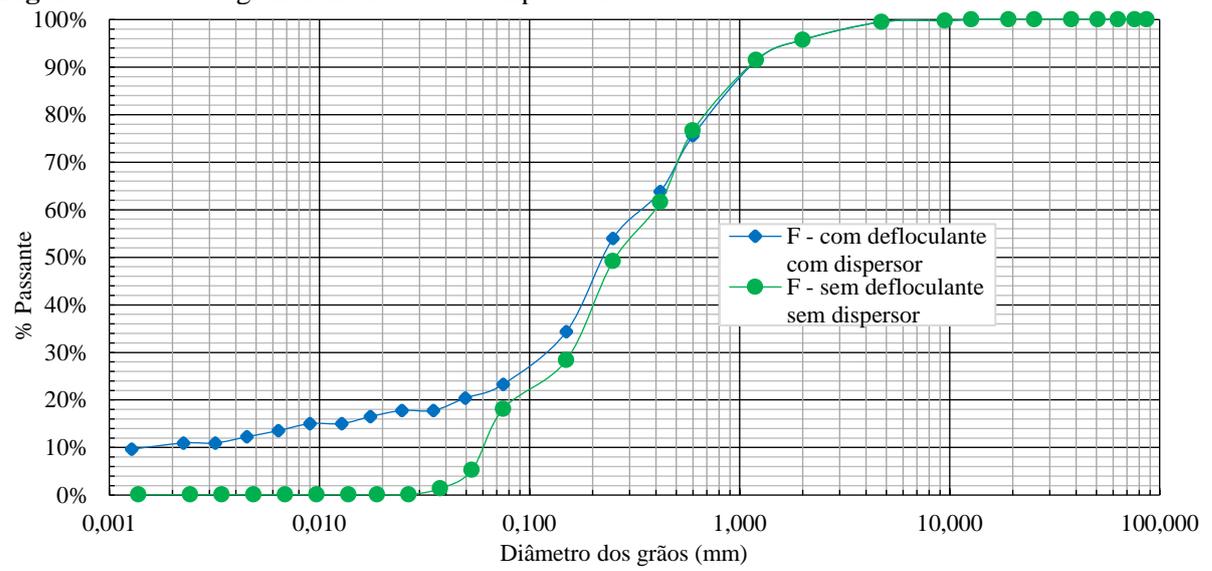
Figura 60 - Curvas granulométricas do composto C**Figura 61** - Curvas granulométricas do composto D**Figura 62** - Curvas granulométricas do composto E

Figura 63 - Curvas granulométricas do composto F

APÊNDICE B - Curvas de resistência à compressão simples

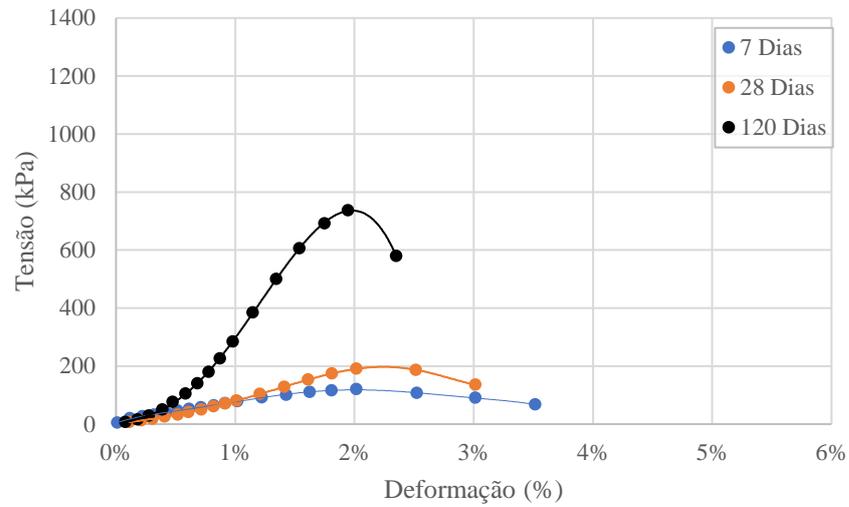
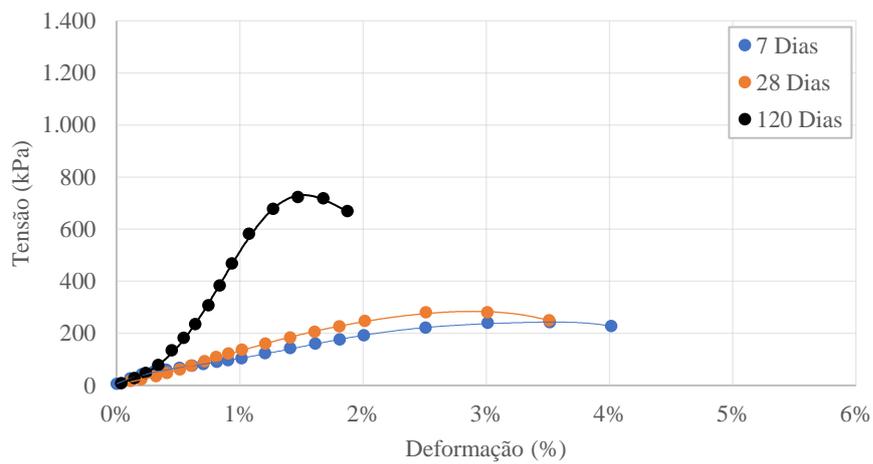
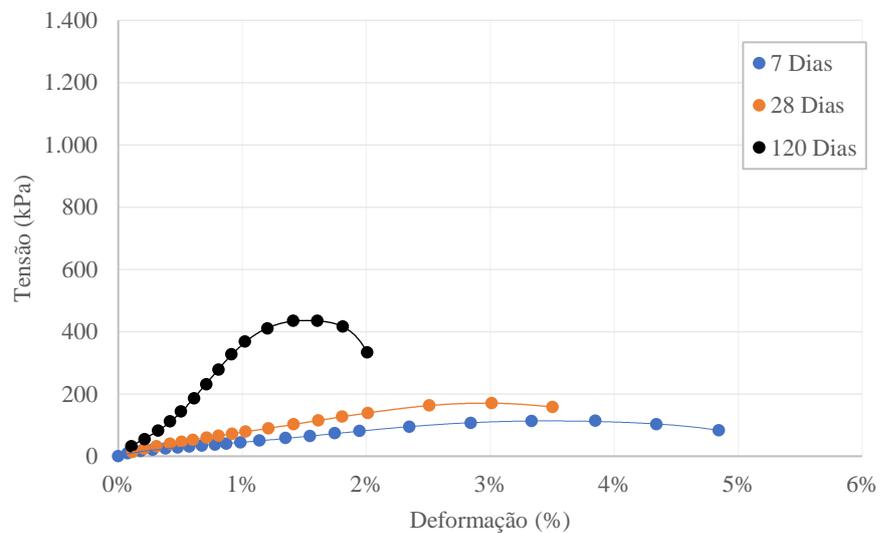
Figura 64 - Curvas de resistência à compressão simples do RCD**Figura 65** - Curvas de resistência à compressão simples do solo**Figura 66** - Curvas de resistência à compressão simples de S3

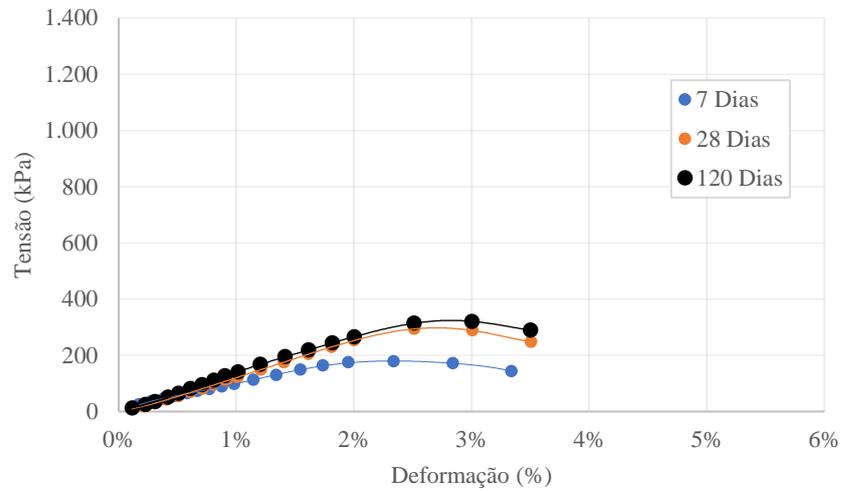
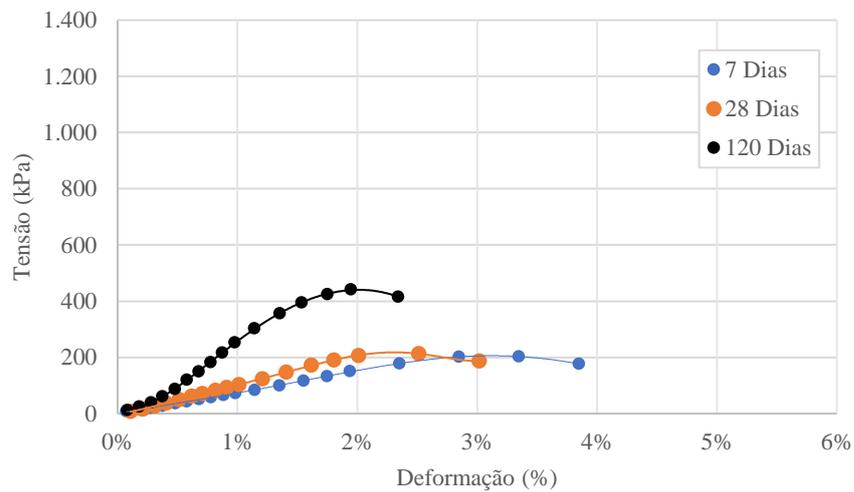
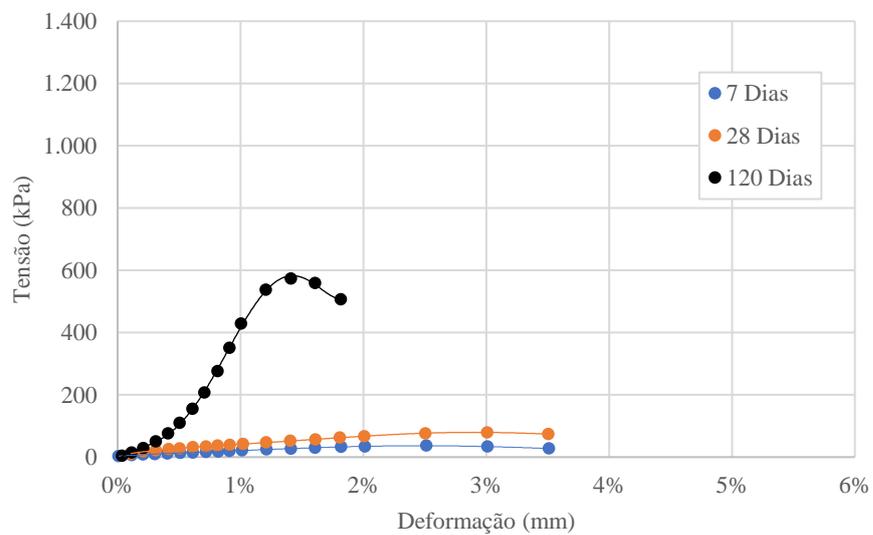
Figura 67 - Curvas de resistência à compressão simples de S5**Figura 68** - Curvas de resistência à compressão simples de S7**Figura 69** - Curvas de resistência à compressão simples do composto A

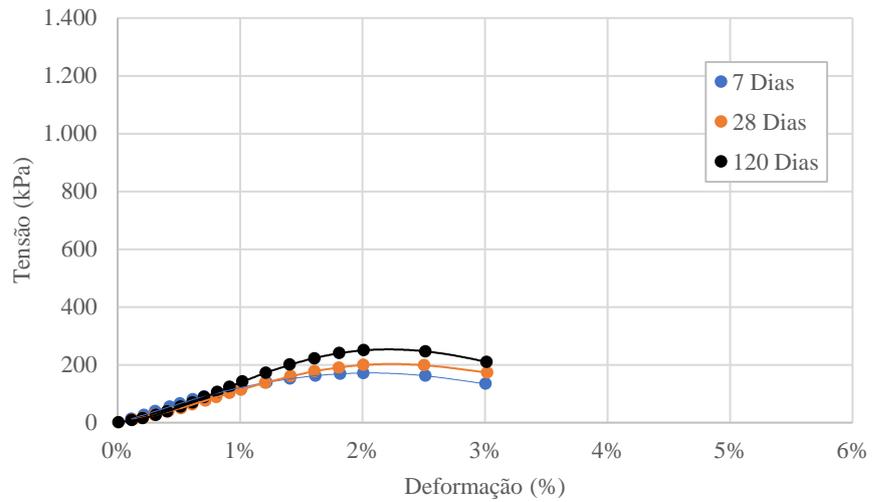
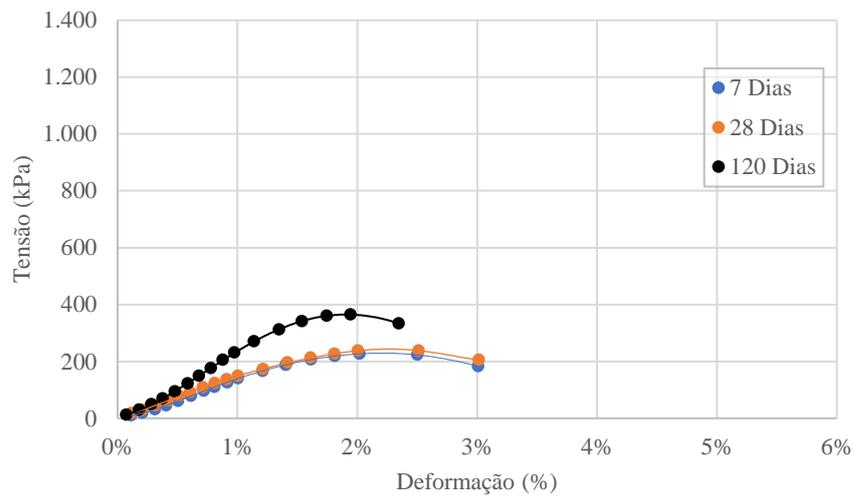
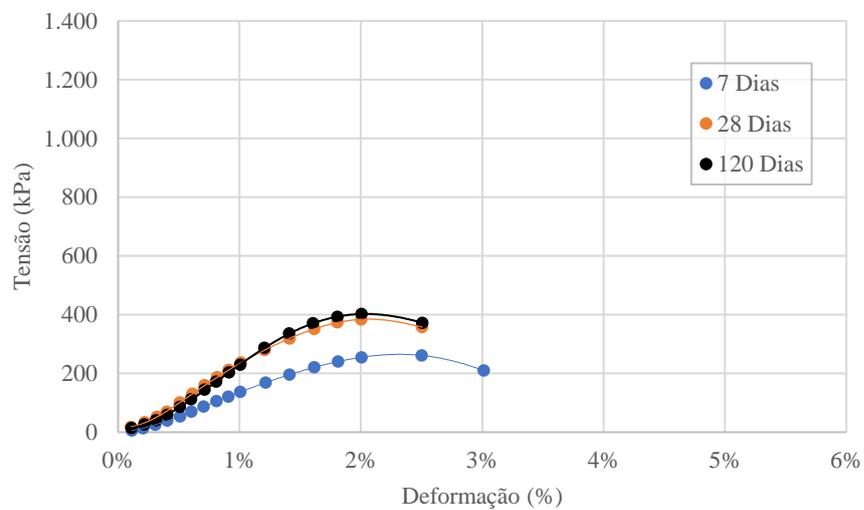
Figura 70 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A3**Figura 71** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A5**Figura 72** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito A7

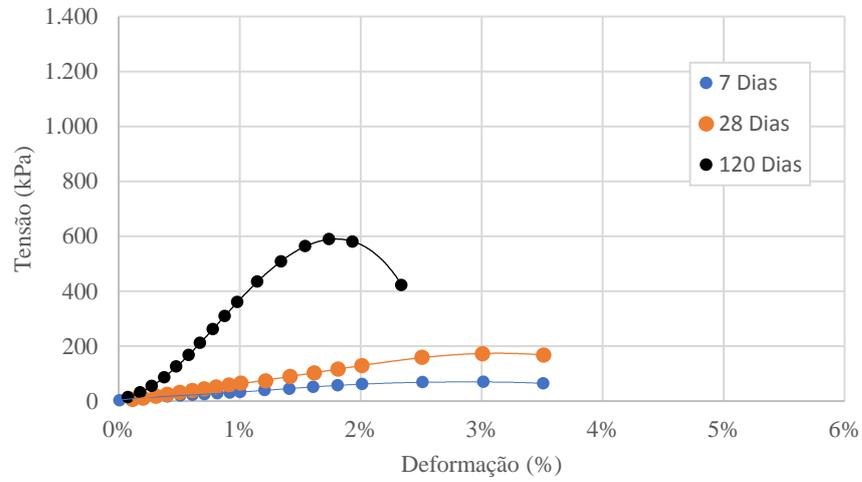
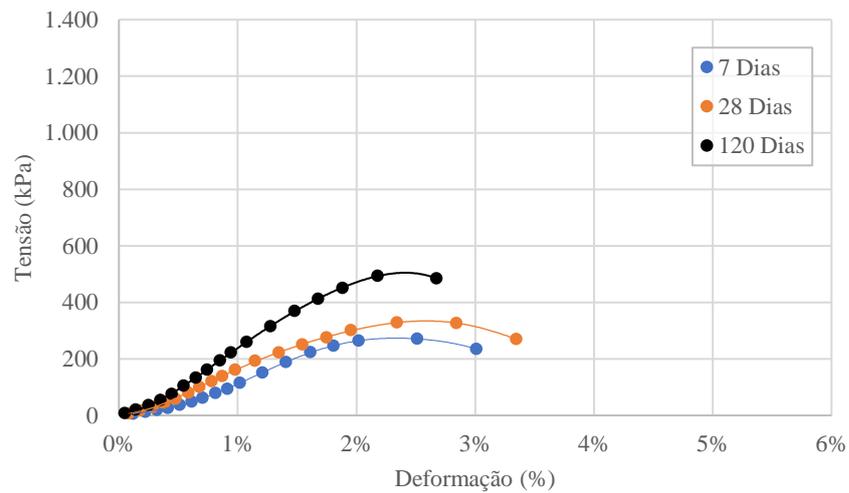
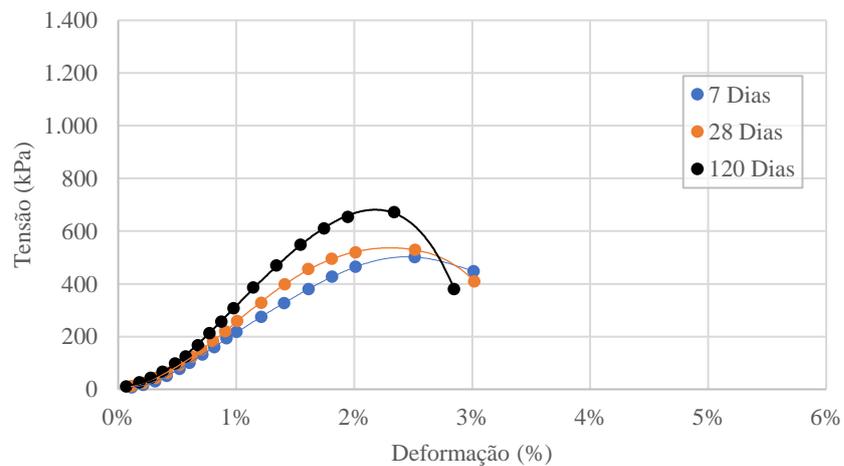
Figura 73 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B**Figura 74** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B3**Figura 75** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B5

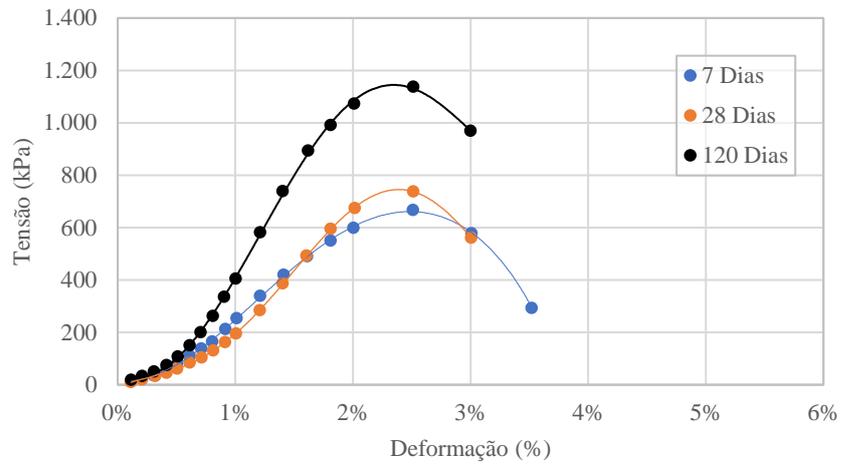
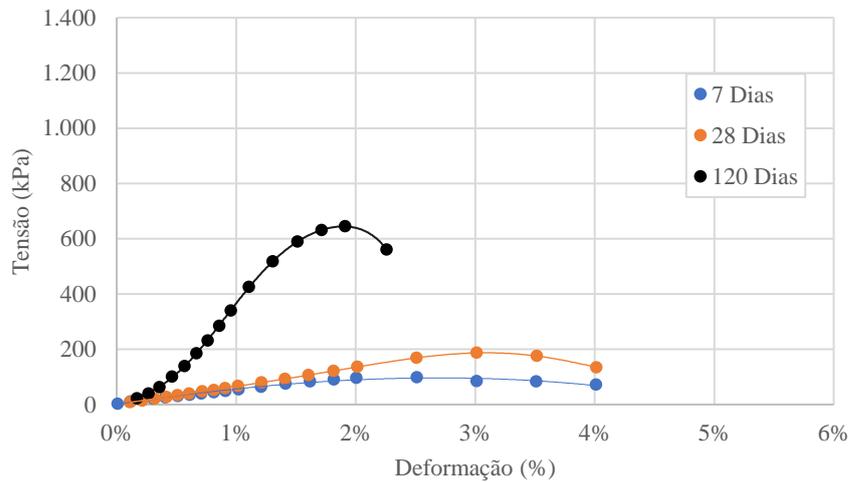
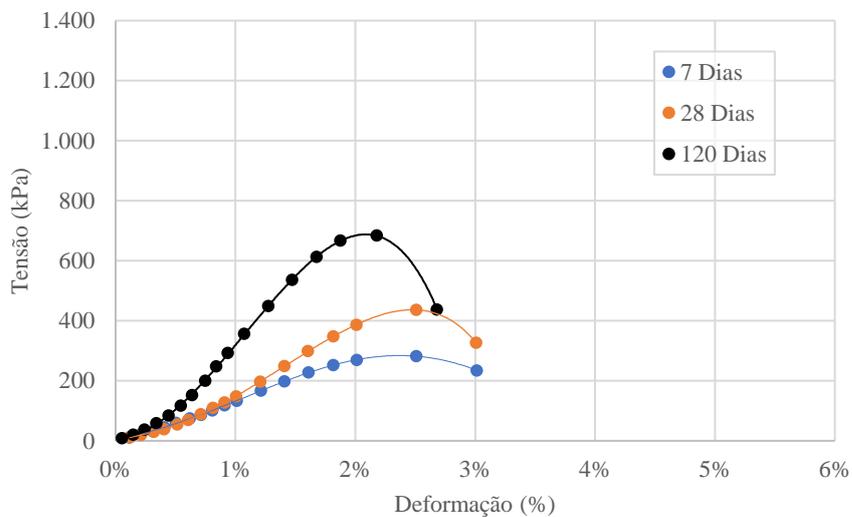
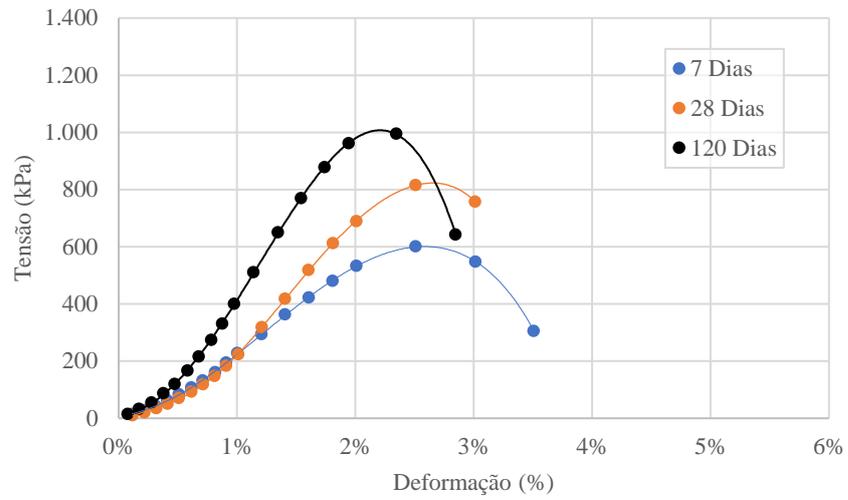
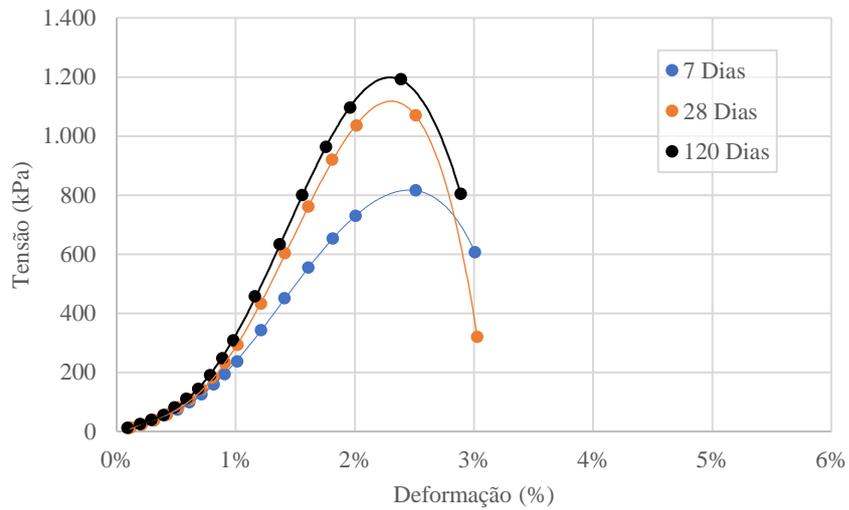
Figura 76 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito B7**Figura 77** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C**Figura 78** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C3

Figura 79 - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C5**Figura 80** - Curvas de resistência à compressão simples do compósito C7

APÊNDICE C – Memória de cálculo de ΔR_0

Tabela 31 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 7 dias

Tempo de cura (dias)	Amostra	Trup (kPa)	Tméd (kPa)	Desvio em relação à média	Módulo	Desvio padrão	$\Delta R0$
7	RCD	164	133,00	31,00	31,00	31,00	1,00
7	RCD	133		0,00	0,00		0,00
7	RCD	102		-31,00	31,00		1,00
7	Solo	271	254,33	16,67	16,67	23,07	0,72
7	Solo	228		-26,33	26,33		1,14
7	Solo	264		9,67	9,67		0,42
7	S3	116	116,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	S3	116		0,00	0,00		0,00
7	S5	194		0,00	0,00		0,00
7	S5	196	194,00	2,00	2,00	2,00	1,00
7	S5	192		-2,00	2,00		1,00
7	S7	234		-3,33	3,33		11,37
7	S7	228	-9,33	9,33	0,82		
7	S7	250	12,67	12,67	1,11		
7	A	30	36,67	-6,67	6,67	11,55	0,58
7	A	30		-6,67	6,67		0,58
7	A	50		13,33	13,33		1,15
7	A3	174	178,33	-4,33	4,33	13,05	0,33
7	A3	193		14,67	14,67		1,12
7	A3	168		-10,33	10,33		0,79
7	A5	238	241,33	-3,33	3,33	19,22	0,17
7	A5	262		20,67	20,67		1,08
7	A5	224		-17,33	17,33		0,90
7	A7	257	272,33	-15,33	15,33	16,62	0,92
7	A7	270		-2,33	2,33		0,14
7	A7	290		17,67	17,67		1,06
7	B	76	76,67	-0,67	0,67	1,15	0,58
7	B	78		1,33	1,33		1,15
7	B	76		-0,67	0,67		0,58
7	B3	270	300,67	-30,67	30,67	31,01	0,99
7	B3	300		-0,67	0,67		0,02
7	B3	332		31,33	31,33		1,01
7	B5	512	506,67	5,33	5,33	9,24	0,58
7	B5	512		5,33	5,33		0,58
7	B5	496		-10,67	10,67		1,15
7	B7	685	686,67	-1,67	1,67	2,89	0,58
7	B7	685		-1,67	1,67		0,58
7	B7	690		3,33	3,33		1,15
7	C	120	128,67	-8,67	8,67	10,26	0,84
7	C	126		-2,67	2,67		0,26
7	C	140		11,33	11,33		1,10
7	C3	282	324,00	-42,00	42,00	59,40	0,71
7	C3	366		42,00	42,00		0,71
7	C5	590	613,33	-23,33	23,33	20,21	1,15
7	C5	625		11,67	11,67		0,58
7	C5	625		11,67	11,67		0,58
7	C7	980	876,67	103,33	103,33	100,17	1,03
7	C7	780		-96,67	96,67		0,97
7	C7	870		-6,67	6,67		0,07

Tabela 32 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 28 dias

Tempo de cura (dias)	Amostra	Trup (kPa)	Tméd (kPa)	Desvio em relação à média	Módulo	Desvio padrão	$\Delta R0$
28	RCD	194	194,00	0,00	0,00	2,00	0,00
28	RCD	196		2,00	2,00		1,00
28	RCD	192		-2,00	2,00		1,00
28	Solo	236	288,67	-52,67	52,67	109,00	0,48
28	Solo	216		-72,67	72,67		0,67
28	Solo	414		125,33	125,33		1,15
28	S3	174	178,67	-4,67	4,67	19,43	0,24
28	S3	162		-16,67	16,67		0,86
28	S3	200		21,33	21,33		1,10
28	S5	294	302,00	-8,00	8,00	10,58	0,76
28	S5	298		-4,00	4,00		0,38
28	S5	314		12,00	12,00		1,13
28	S7	228	222,00	6,00	6,00	7,21	0,83
28	S7	224		2,00	2,00		0,28
28	S7	214		-8,00	8,00		1,11
28	A	106	84,67	21,33	21,33	23,18	0,92
28	A	88		3,33	3,33		0,14
28	A	60		-24,67	24,67		1,06
28	A3	212	206,00	6,00	6,00	5,29	1,13
28	A3	204		-2,00	2,00		0,38
28	A3	202		-4,00	4,00		0,76
28	A5	256	248,00	8,00	8,00	8,00	1,00
28	A5	248		0,00	0,00		0,00
28	A5	240		-8,00	8,00		1,00
28	A7	408	396,00	12,00	12,00	22,54	0,53
28	A7	370		-26,00	26,00		1,15
28	A7	410		14,00	14,00		0,62
28	B	168	180,00	-12,00	12,00	43,27	0,28
28	B	228		48,00	48,00		1,11
28	B	144		-36,00	36,00		0,83
28	B3	358	340,00	18,00	18,00	15,62	1,15
28	B3	332		-8,00	8,00		0,51
28	B3	330		-10,00	10,00		0,64
28	B5	590	570,00	20,00	20,00	17,44	1,15
28	B5	558		-12,00	12,00		0,69
28	B5	562		-8,00	8,00		0,46
28	B7	800	786,67	13,33	13,33	41,63	0,32
28	B7	820		33,33	33,33		0,80
28	B7	740		-46,67	46,67		1,12
28	C	254	208,00	46,00	46,00	47,03	0,98
28	C	210		2,00	2,00		0,04
28	C	160		-48,00	48,00		1,02
28	C3	336	409,33	-73,33	73,33	74,01	0,99
28	C3	484		74,67	74,67		1,01
28	C3	408		-1,33	1,33		0,02
28	C5	860	853,33	6,67	6,67	30,55	0,22
28	C5	880		26,67	26,67		0,87
28	C5	820		-33,33	33,33		1,09
28	C7	1140	1150,00	-10,00	10,00	45,83	0,22
28	C7	1110		-40,00	40,00		0,87
28	C7	1200		50,00	50,00		1,09

Tabela 33 - Valores de média, desvio em relação à média, desvio padrão e $\Delta R0$ aos 120 dias

Tempo de cura (dias)	Amostra	Trup (kPa)	Tméd (kPa)	Desvio em relação à média	Módulo	Desvio padrão	$\Delta R0$
120	RCD	800	793,33	6,67	6,67	11,55	0,58
120	RCD	780		-13,33	13,33		1,15
120	RCD	800		6,67	6,67		0,58
120	Solo	700	720,00	-20,00	20,00	23,09	0,87
120	Solo	740		20,00	20,00		0,87
120	Solo	740		20,00	20,00		0,87
120	Solo	700		-20,00	20,00		0,87
120	S3	480	445,00	35,00	35,00	49,50	0,71
120	S3	410		-35,00	35,00		0,71
120	S5	330	325,00	5,00	5,00	7,07	0,71
120	S5	320		-5,00	5,00		0,71
120	S7	470	470,00	0,00	0,00	50,00	0,00
120	S7	420		-50,00	50,00		1,00
120	S7	520		50,00	50,00		1,00
120	A	720	580,00	140,00	140,00	131,15	1,07
120	A	460		-120,00	120,00		0,91
120	A	560		-20,00	20,00		0,15
120	A3	290	278,67	11,33	11,33	16,29	0,70
120	A3	286		7,33	7,33		0,45
120	A3	260		-18,67	18,67		1,15
120	A5	385	378,33	6,67	6,67	16,07	0,41
120	A5	390		11,67	11,67		0,73
120	A5	360		-18,33	18,33		1,14
120	A7	445	413,33	31,67	31,67	32,53	0,97
120	A7	380		-33,33	33,33		1,02
120	A7	415		1,67	1,67		0,05
120	B	570	603,33	-33,33	33,33	85,05	0,39
120	B	700		96,67	96,67		1,14
120	B	540		-63,33	63,33		0,74
120	B3	550	516,67	33,33	33,33	30,55	1,09
120	B3	510		-6,67	6,67		0,22
120	B3	490		-26,67	26,67		0,87
120	B5	720	690,00	30,00	30,00	36,06	0,83
120	B5	700		10,00	10,00		0,28
120	B5	650		-40,00	40,00		1,11
120	B7	1100	1166,67	-66,67	66,67	115,47	0,58
120	B7	1300		133,33	133,33		1,15
120	B7	1100		-66,67	66,67		0,58
120	C	680	655,00	25,00	25,00	35,36	0,71
120	C	630		-25,00	25,00		0,71
120	C3	740	723,33	16,67	16,67	20,82	0,80
120	C3	700		-23,33	23,33		1,12
120	C3	730		6,67	6,67		0,32
120	C5	1070	1080,00	-10,00	10,00	17,32	0,58
120	C5	1100		20,00	20,00		1,15
120	C5	1070		-10,00	10,00		0,58
120	C7	1330	1315,00	15,00	15,00	85,44	0,18
120	C7	1430		115,00	115,00		1,35
120	C7	1250		-65,00	65,00		0,76
120	C7	1250		-65,00	65,00		0,76