



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

FRANCISCO CARDOSO DOS SANTOS NETO

**USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA
MELHORAMENTO DE SOLOS COLAPSÍVEIS**

Recife, PE

2015



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

FRANCISCO CARDOSO DOS SANTOS NETO

**USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA
MELHORAMENTO DE SOLOS COLAPSÍVEIS**

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 Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Co-orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife, PE

2015

FRANCISCO CARDOSO DOS SANTOS NETO

**USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL PARA
MELHORAMENTO DE SOLOS COLAPSÍVEIS**

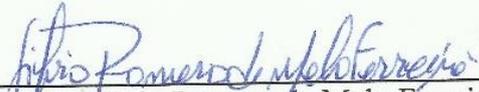
BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



Profa. Dra. Stela Fucala Sukar
Universidade de Pernambuco - UPE

Co-orientador:

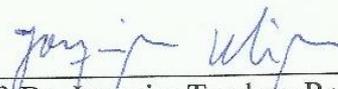


Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Examinadores:



Profa. Dra. Kaliny Patricia Vaz Lafayette
Universidade de Pernambuco - UPE



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

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Universidade de Pernambuco – Recife

S337u Santos Neto, Francisco Cardoso dos
Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de
solos colapsíveis / Francisco Cardoso dos Santos Neto –
Recife: UPE, Escola Politécnica, 2015.
143 f.: il.

Orientador: Dra. Stela Fucale Sukar

Co-orientador: Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade
de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, 2015.

1. Resíduo da Construção Civil 2. Solo Colapsível 3.
Melhoramento 4. Sustentabilidade I. Engenharia Civil -
Dissertação II. Sukar, Stela Fucale (orient.) III. Ferreira,
Silvio Romero de Melo (co-orient.) IV. Universidade de
Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção
Civil. IV. Título.

CDD: 690.0286

Dedico este trabalho
À minha Filha, **Lara**.
À minha esposa, **Thais**.
Aos meus pais, **Inês e Cardoso**.
Pelo amor, dedicação e conselhos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado a capacidade e a oportunidade de escolher e trilhar meus caminhos.

À minha mãe, Inês, amor maior, exemplo de força e dedicação, agradeço por estar sempre ao meu lado, por me apoiar e me incentivar, por segurar firme na minha mão sempre que preciso. Ao meu pai, Cardoso, agradeço por repassar tranquilidade e me fazer enxergar o melhor caminho a seguir.

De maneira muito especial ao amor da minha vida, Thaís, pelo apoio incondicional e paciência durante o período do mestrado. À minha filhota Lara, estrela da minha vida, pela emoção, carinho e torcida transmitidos. Peço perdão pelas vezes que não pude brincar ou dar um pouco mais de atenção nos momentos de estudo.

Às minhas irmãs, Cris, Gal, Rose e Tham, pelo amor, apoio, incentivo e torcida prestados. Agradeço a minha família, tios e primos, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus sogros, Mauricio e Isabel, e cunhada Vanele, por comemorarem cada pequena conquista minha como se fossem suas.

A minha querida orientadora, Prof^a Dr^a Stela Fucale e co-orientador, Prof^o Dr^o Sílvio Romero de Melo Ferreira, por suas orientações, de fundamental importância para a realização deste trabalho, pelo seu apoio, serenidade, pela dedicação na orientação e acima de tudo, pela amizade construída durante esse período.

Aos Professores membros da Banca Examinadora, Prof^o Dr^o Joaquim Teodoro Romão e a Prof^a Dr^a Kalinny Lafayette pelas contribuições dadas durante o seminário de qualificação e defesa.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CNPq, pela bolsa de estudos e CAPES pelo financiamento, a qual possibilitou a realização desse trabalho. Ao Grupo de Pesquisa de Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente – AMBITEC.

Aos docentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PEC, pelas inúmeras contribuições, incentivo e apoio; e à secretária Lúcia Rosani, pela atenção dada aos mestrandos.

Aos amigos do Mestrado em Engenharia Civil, em especial à Andrea Nunes, Camila Borba, Diogo Henrique, Alexandre Leão, Daniela Albuquerque, e Diego Viegas, pela amizade, companheirismo, brincadeiras, estudos e aprendizados durante essa jornada.

A Kleyde Veríssimo, pela amizade, incentivo e apoio. E por ceder dados da sua pesquisa, onde serviram de comparação para os resultados do meu trabalho. Meu muito obrigado.

Aos Laboratoristas Leandro (UNICAP) e Fábio (POLI/UPE) pelas suas amizades e ajudas nos procedimentos experimentais, fundamental para a realização deste trabalho.

A bolsista de Iniciação Científica e companheira de ensaios, Aline, pela sua amizade, momentos de descontração e ajuda, durante o período de ensaios no LMS.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SANTOS NETO, Francisco Cardoso dos. **Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsíveis**. Recife: UPE, 2015. 140 p. Dissertações (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2015.

RESUMO

A cadeia produtiva da construção civil, desde à preparação de atividades iniciais da terraplenagem à produção, o uso efetivo das instalações e a manutenção das edificações depende de um fluxo constante de materiais. Sabe-se que suas perdas, desperdícios e impactos causados pelo grande volume de extração de matérias primas são inúmeras. Diante disto, a reciclagem de resíduos de construção (RCC) surge como uma maneira sustentável de se reduzir os problemas causados por sua geração. Além desta questão dos resíduos, o intenso crescimento populacional traz consigo uma demanda por novas moradias, onde precisam ser edificadas em áreas, por exemplo, com ocorrência de solos colapsíveis. Essas áreas podem sofrer com a falta de resistência dos solos, pois apresentam comportamento particularizado quando submetidos a determinadas condições de umidade, ocasionando danos às edificações. Esta pesquisa tem como objetivo analisar o uso de RCC como alternativa para melhoramento de solo colapsível, por meio de misturas nas proporções de 10%, 30% e 50% de adição do resíduo ao solo, para redução da colapsibilidade do solo. No programa experimental foram realizados coleta, preparação das amostras, ensaios de caracterização física (análise da composição gravimétrica, granulometria, densidade real e compactação) e mecânica (edométricos simples e duplos). Conforme resultados obtidos, o principal constituinte do RCC foi o material cinza composto por concreto e argamassa (35,66%) e o proveniente de tijolos cerâmicos (31,16%), que classifica o resíduo como material misto. O solo é essencialmente arenoso com cerca de 90% de areia, com fração argilosa de 7 % e muito pouco silte (3%). O solo é mau graduado ($C_u < 5$), não líquido e não plástico, se enquadrando no grupo SP-SM (areia fina siltosa mal graduada), na classificação do SUCS. A adição do resíduo ao solo melhorou sua granulometria, deixando-o uniforme. O ensaio de compactação teve maior influência na amostra de RCC, o que provocou uma quebra significativa de suas partículas melhorando sua uniformidade, o solo passa de A-2-5 para A-1-b, melhorando suas características para uso em subleito de pavimentos. O valor do peso específico aparente seco máximo é de $18,50 \text{ kN/m}^3$ e umidade ótima de 7,3%. As umidades ótimas das amostras, em geral, apresentaram aumento de acordo com o acréscimo de RCC, enquanto o peso específico seco máximo quase que se manteve igual em todas as misturas, sendo maiores que a do RCC pesquisado. Os valores dos potenciais de colapso decrescem com o acréscimo do percentual de RCC, com o aumento da umidade inicial e do grau de compactação. O colapso do solo atingiu maior magnitude na umidade natural (0,2%), alcançando um valor máximo de 8,38% na tensão de 160 kPa, para um grau de compactação de 85%. Enquanto, os maiores valores de potencial de colapso do solo nas condições de 90 e 95% de GC foram de 5,99% e 4,05%, respectivamente sob tensão de 160kPa. As misturas, com 30% e 50% de RCC obtiveram valores de 5,72% e 5,8%, respectivamente, na mesma tensão (160 kPa), na umidade natural e grau de compactação de 85%. Concluiu-se que com a adição do RCC ao solo colapsível de Petrolina, o potencial de colapso foi reduzido de maneira significativa.

Palavras-chave: Resíduo da Construção Civil. Solo Colapsível. Melhoramento. Sustentabilidade.

SANTOS NETO, Francisco Cardoso dos. **Use of construction waste to improvement collapsible soils**. Recife: UPE, 2015. 140p. Master in Civil Engineering – Polytechnic School of Pernambuco, Pernambuco University. Recife, 2015.

ABSTRACT

The production chain of construction, since the preparation of initial activities embankment production, the effective use of facilities and maintenance of buildings depends on a constant flow of materials. It is known that its losses, waste and impacts caused by the large volume of raw materials extraction are numerous. Given this, the recycling of construction and demolition waste (CDW) arises as a sustainable way to reduce the problems caused by his generation. Apart from this waste matter, the intense population growth brings with it a demand for new housing, which need to be built in areas, for example, occurrence of collapsible soils. These areas may suffer from a lack of soil resistance, since they have individualized behavior when subjected to certain wet conditions, causing damage to buildings. This research aims to analyze the use of CDW as an alternative to a collapsible soil improvement through mixtures in the proportions of 10%, 30% and 50% addition of residue to soil for reducing soil collapsibility. In the experimental program were carried out collection, sample preparation, physical characterization tests (analysis of gravimetric composition, particle size, bulk density and compression) and mechanical (single and double edometric test). As results, the main constituent of CDW was the gray material composed of concrete and mortar (35.66%) and from ceramic bricks (31.16%), which classifies waste as mixed material. The soil is sandy essentially of about 90% sand with clay fraction of 7% and very little silt (3%). The soil is poor graduate ($C_u < 5\%$), not liquid and not plastic and it fits in SP-MS group (poorly graded silty fine sand), the classification of the USCS. The addition of the residue to the soil improved its particle size, making it uniform. The compaction test had greater influence in the sample of CDW, which caused a significant drop of its particles improving uniformity, the soil passes from A-2-5 to A-1-b, improving its characteristics for use in subgrade pavements. The value of the apparent maximum specific dry weight is 18.50 kN/m^3 and optimum moisture content of 7.3%. The optimum moisture content of the samples generally exhibited increased according to the increase CDW, while the maximum dry unit weight remained almost the same in all mixtures, being larger than the CDW searched. The values of the potential collapse decrease with the increase of the percentage of CDW, with the addition of the initial moisture and the increase in the degree of compaction. The soil collapse reached greater magnitude in natural moisture (0.2%), reaching a maximum of 8.38% in the tension value of 160 kPa for a compact ness degree of 85%. Meanwhile, the higher potential values of the soil collapse under the conditions of 90 and 95% GC were 5.99% and 4.05% respectively under 160kPa voltage. The mixtures with 30% and 50% values obtained CDW 5.72% and 5.8%, respectively, at the same pressure (160 kPa), the natural moisture and degree of compactness 85%. It is concluded that with the addition of the construction and demolition waste in collapsible soil Petrolina, the potential collapse has been reduced significantly.

Keywords: Construction waste. Collapsible soil. Improvement. Sustainability.

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
Cc	Coefficiente de Curvatura
Cc	Coefficiente de Compressão
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cs	Coefficiente de Descompressão
Cu	Coefficiente de Uniformidade
D ₁₀	Diâmetro Efetivo
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
GC	Grau de Compactação
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LI	Limite de Liquidez
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PIGRCC	Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINDUSCON	Sindicato das Indústrias da Construção Civil

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - RCC Coletados nas Regiões do Brasil - ton/dia.....	27
Figura 2 - Hierarquia dos resíduos na Diretiva de Resíduos da UE, de 2008.	29
Figura 3 - Blocos fabricados com RCC.	35
Figura 4 - Resultados das resistências à compressão médias. (a) Aos 14 dias. (b) Aos 28 dias.	36
Figura 5 – Execução do trecho experimental com RCC.	38
Figura 6 - Modelos de estruturas instáveis de solos colapsíveis.	40
Figura 7–Exemplo de ensaio edométrico simples e duplo.	41
Figura 8 - Solos Colapsíveis no Brasil - Carta de Plasticidade / Diagrama de Van Der Merve (1964) / Critério de Gibbs e Bara (1967).	41
Figura 9 - Ocorrência de Solos colapsíveis no mundo.....	42
Figura 10 - Solos Colapsíveis estudados no Brasil.	43
Figura 11 - Ocorrência nas regiões do Brasil (Publicadas).	44
Figura 12 - Solos colapsíveis.....	44
Figura 13 - Suscetibilidade ao colapso dos solos no Estado de Pernambuco.	45
Figura 14 -Danos ocasionados por construções assentadas em solos colapsíveis.....	46
Figura 15 - Município de Petrolina.	46
Figura 16 - Fissuras devido ao colapso - Privê Village/ Petrolina-PE.....	48
Figura 17 - Carta de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e alguns locais de ocorrências.....	49
Figura 18 - Critério de Reginato e Ferrero (1970).....	49
Figura 19 - Critério de colapsibilidade de DESIGN OF SMALL (1960 – 1974).	50
Figura 20 -Curvas granulométricas das amostras.	51
Figura 21 – Comportamento do acréscimo da fração menor do que 0,074 mm.	51
Figura 22 – Comportamento do acréscimo de lodo de esgoto a um solo colapsível em diferentes proporções.	52
Figura 23 - Porcentagem de volume de cada componente da mistura (%).	53
Figura 24–a) Solo Natura e b) Mistura Solo-Lodo.	53
Figura 25 – Fluxograma do programa experimental.....	55
Figura 26 - Perfil do solo colapsível.	56
Figura 27–Local de coleta de amostras indeformadas de solo.	57

Figura 28 – Amostras de solo pesadas e armazenadas em sacos plásticos.	57
Figura 29 - Local da coleta de RCC.....	58
Figura 30 - Resíduo da construção civil coletado.....	58
Figura 31 – Separação dos materiais (a) e material miúdo passante na # 4,75mm (b).....	59
Figura 32 – Amostras homogêneas (a) e Amostra ensacada (b).	59
Figura 33 – Amostras de materiais indesejáveis.....	60
Figura 34 - Britador de mandíbulas.	61
Figura 35– RCC beneficiado ($\varnothing_{\text{máx.}} < 4,75 \text{ mm}$).....	61
Figura 36 – Jogo de Peneiras (a) e Ensaio de sedimentação (b).....	63
Figura 37 - Ensaio da massa específica do agregado miúdo reciclado. a) Bomba a vácuo e Picnômetro; b) Retirada do ar do picnômetro.	64
Figura 38 – Amostra umidificada (a) e Amostra compactada (b).	65
Figura 39 – Prensas edométricas (a) e Célula (b).	66
Figura 40 - Molde de aço para compactação do solo.....	67
Figura 41 - Processo de confecção dos corpos de prova.....	68
Figura 42 - Esquema de montagem das células edométricas convencionais.	68
Figura 43 - Curvas granulométricas das amostras estudadas.	73
Figura 44 - Curvas de compactação das amostras estudadas.	76
Figura 45 - Curvas de compactação do solo, RCC _{#30} e misturas.	78
Figura 46. Formas de curvas de compactação encontradas em diferentes tipos de solos.	79
Figura 47 - Modelo de comportamento da curva de compactação para umidade à esquerda do ramo ascendente.....	80
Figura 48 - Curvas granulométricas das amostras antes e depois da compactação (D.C.).	82
Figura 49 – Coeficiente de curvatura e uniformidade das amostras deste estudo, antes e depois da compactação.....	82
Figura 50 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade natural, nos diferentes Graus de Compactação (GC).....	85
Figura 51 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade de 4%, nos diferentes Graus de Compactação (GC).	86
Figura 52 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade de 7%, nos diferentes Graus de Compactação (GC).	87
Figura 53 -Variação dos potenciais de colapso das amostras nas umidades e graus de compactação estudados (Edométrico Simples).	90

Figura 54 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação, na umidade natural das amostras estudadas nas condições natural e inundado.	92
Figura 55 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4% nas condições natural e inundado.	94
Figura 56 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7% nas condições natural e inundado.	95
Figura 57 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação, na umidade inicial de 0,2% para o Solo e 1% para as misturas de solo com RCC#30.	97
Figura 58 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4%.	98
Figura 59 – Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7%.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa média de desperdício de materiais de construção em obras.....	27
Tabela 2 - Geração e Reciclagem de RCC em alguns países.	31
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias	34
Tabela 4 – Resistência à Compressão Simples.....	35
Tabela 5 - Porcentagem de materiais.	71
Tabela 6 - Principais constituintes do RCC em pesquisas.	72
Tabela 7 - Percentuais de materiais indesejáveis em outras pesquisas com RCC Misto.....	72
Tabela 8 - Percentual das frações por constituintes (ABNT).	73
Tabela 9 – Coeficiente de uniformidade e curvatura das amostras deste estudo.	74
Tabela 10 – Valores de densidade real dos materiais desta pesquisa.	75
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compactação.....	76
Tabela 12 - Valores de Peso específico e Umidade ótima de outras pesquisas.	77
Tabela 13 - Resumo classificação das curvas de compactação.....	80
Tabela14 - Percentual das frações por constituintes depois da compactação (D.C.).....	83
Tabela 15 – Variação dos pesos específicos aparente seco das amostras estudadas.	84
Tabela 16 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade inicial solo (0,2%) e Misturas (1%) (Edométrico Simples).	88
Tabela 17 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade de 4% (Edométrico Simples).....	88
Tabela 18 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade de 7% (Edométrico Simples).....	89
Tabela 19–Valores de redução dos potenciais de colapso das misturas estudadas (Edométrico Simples).....	91
Tabela 20 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade natural do solo ($w = 0,2\%$) e misturas ($w = 1\%$).	102
Tabela 21 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade de $w = 4\%$	102
Tabela 22 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade de $w = 7\%$	103

Tabela 23 - Índice de Compressão e Expansão das amostras, nas diferentes condições estudadas.	104
Tabela 24 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 0,2%.....	134
Tabela 25 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.....	134
Tabela 26 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.....	135
Tabela 27 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.....	135
Tabela 28 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.....	136
Tabela 29 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.....	136
Tabela 30 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.....	137
Tabela 31 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.....	137
Tabela 32 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.....	138
Tabela 33 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.....	138
Tabela 34 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.....	139
Tabela 35 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.....	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos com RCC e suas aplicações.	32
Quadro 2 – Resultado do ensaio de resistência mecânica à compressão axial.....	36
Quadro 3 - Características de um Solo colapsível.	39
Quadro 4 - Quadro resumo dos ensaios realizados na investigação laboratorial.	62
Quadro 5 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 85%.	124
Quadro 6 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 90%.	125
Quadro 7 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 95%.	126
Quadro 8 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 85%.....	127
Quadro 9 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 90%.....	128
Quadro 10 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 95%.....	129
Quadro 11 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 85%.....	130
Quadro 12 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 90%.....	131
Quadro 13 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 95%.....	132

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações iniciais	17
1.2 Justificativa	19
1.3 Objetivos	20
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	20
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	20
1.4 Metodologia.....	21
1.5 Estrutura da Dissertação	22
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 Resíduos da Construção Civil (RCC).....	23
2.1.1 <i>Definição</i>	24
2.1.2 <i>Classificação</i>	25
2.1.3 <i>Aspectos na Engenharia Civil</i>	26
2.1.4 <i>Legislação</i>	28
2.1.5 <i>Reciclagem de RCC</i>	30
2.2 Alternativas para o Reaproveitamento de RCC	32
2.2.1 <i>Concreto</i>	33
2.2.2 <i>Blocos de Concreto</i>	34
2.2.3 <i>Pavimentação</i>	37
2.3 Solos Colapsíveis	38
2.3.1 <i>Definição</i>	38
2.3.2 <i>Características do solo colapsível</i>	39
2.3.3 <i>Ocorrência de solos colapsíveis</i>	42
2.3.4 <i>Problemas ocasionados por solos colapsíveis</i>	45

2.4	Características socioeconômicas e fisiográficas do município de Petrolina.....	46
2.5	Melhoramento de Solos Colapsíveis	50
 CAPÍTULO 3 - MATERIAS E MÉTODOS		54
3.1	Programa de Investigação Experimental.....	54
3.2	Coleta e Preparação das Amostras.....	56
3.2.1	<i>Solo</i>	56
3.2.2	<i>Resíduos da Construção Civil</i>	57
3.2.3	<i>Composição Gravimétrica do RCC.....</i>	59
3.2.3.1	<i>Materiais Indesejáveis.....</i>	60
3.2.4	<i>Beneficiamento do RCC.....</i>	60
3.2.5	<i>Definição da granulometria e percentuais de RCC</i>	62
3.3	Caracterização física.....	63
3.3.1	<i>Granulometria</i>	63
3.3.2	<i>Densidade real.....</i>	63
3.3.3	<i>Limites de Atterberg.....</i>	64
3.3.4	<i>Compactação.....</i>	64
3.4	Caracterização mecânica	65
3.4.1	<i>Ensaio de compressão edométrica</i>	65
3.4.1.1	<i>Preparação dos Corpos de Prova</i>	66
3.4.1.2	<i>Procedimentos gerais Edométrico Simples e Duplos</i>	69
3.4.1.3	<i>Ensaio edométrico duplos</i>	70
 CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS		71
4.1	Caracterização Física.....	71
4.1.1	<i>Composição Gravimétrica</i>	71

4.1.2	<i>Granulometria</i>	73
4.1.3	<i>Densidade real</i>	75
4.1.4	<i>Limites de consistência</i>	75
4.1.5	<i>Compactação</i>	75
4.1.5.1	Formas das curvas de compactação	78
4.1.5.2	Influência da compactação na granulometria.....	81
4.2	Caracterização Mecânica	83
4.2.1	<i>Ensaio Edométrico</i>	83
4.2.1.1	Edométrico Simples.....	83
4.2.1.2	Potencial de Colapso.....	88
4.2.2	<i>Ensaio Edométrico Duplo</i>	92
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		105
5.1	Conclusões	105
5.2	Recomendações	108
REFERÊNCIAS		109
APÊNDICE A		123
APÊNDICE B		133

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a diversidade dos resíduos da construção civil (RCC), abordando aspectos como a busca da sustentabilidade na construção civil, a elevada taxa de geração do RCC e seu potencial de reuso e reciclagem, assim como a problemática ocasionada pelos solos colapsíveis. São apresentadas ainda as justificativas que motivaram a execução da pesquisa, ao apresentar uma nova alternativa de destinação para o RCC, aliado ao melhoramento de solo colapsível, assim como os objetivos, a metodologia e estrutura.

1.1 Considerações iniciais

Um dos maiores desafios ambientais enfrentados pela população mundial nas últimas décadas é a gestão eficiente dos resíduos sólidos, devido a sua grande produção e diversidade, ficando cada vez mais difícil lhe dar uma destinação ecologicamente correta e sustentável. A crescente conscientização da necessidade de se preservar o meio ambiente, evitando sua degradação, potencializada pelos princípios do “desenvolvimento sustentável”, tem buscado, dentre outras práticas, a redução do consumo de matéria prima em todos os setores da economia.

No Brasil, a Construção Civil é um dos principais pilares da economia e o maior gerador de empregos diretos e indiretos do país, pois até o final de dezembro de 2012 tinha 3,27 milhões de trabalhadores com carteira assinada, crescendo 3% no país em 2012, sendo responsável por cerca de 8% do Produto Interno Bruto - PIB (CBIC, 2013).

Entretanto, este elevado índice de atividades construtivas acarreta no alto consumo de matérias primas e na volumosa geração de Resíduos da Construção Civil (RCC), originando sérios impactos ambientais, financeiros e sociais. Estima-se, por exemplo, que o setor construtivo consome entre 20% e 50% de todos os recursos naturais disponíveis e não renováveis (MESQUITA, 2012). Para Sáez et al. (2012), apesar do momento atual de declínio desta atividade em alguns países, devido às mudanças no ciclo econômico, os problemas causados por esses resíduos, ou melhor, pela sua gestão deve ser constantemente considerada.

De acordo com o Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Pernambuco – SINDUSCON/PE, a quantidade gerada de resíduos na Região Metropolitana do Recife (RMR)

gira em torno de 4.500 toneladas por dia. A previsão para o restante do estado, é de 1.575 toneladas por dia. Do total de RCC do estado, cerca de 30% gerado resulta de empresas construtoras de maior porte, enquanto que o restante é gerado por pessoas físicas, reformas de lojas, pequenas construções, entre outros pequenos geradores (PERNAMBUCO, 2012).

Destaca-se também que é o setor produtivo que mais gera resíduos sólidos, representando mais de 50% dos resíduos produzidos nas grandes cidades. Ainda, segundo Gusmão (2008), mais de 90% dos RCC tem grande potencial de reutilização e reciclagem, com características e propriedades que atendem as normas técnicas. A reutilização e a reciclagem como estratégias de minimização de resíduos oferecem diversos benefícios como a diminuição de energia necessária para a produção de novos materiais e sua reutilização, que de outra forma teria o aterro como destino final (MÁLIA, 2010).

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reutilizar os RCC como agregados reciclados dentro da própria construção civil (Agopyan e John, 2011; Viacelli, 2012; Proença, 2012; França *et al.*, 2013; Farias, 2013; Macedo, 2013), com possíveis usos em produção de argamassas, blocos de concreto, estacas de compactação, pavimentação, entre outros, a fim de incentivar o reaproveitamento e reciclagem dos mesmos, reduzindo desta maneira os impactos a eles associados.

Outra situação inconveniente na Engenharia Civil são os danos causados em construções assentadas em solos colapsíveis. A ocorrência de solos superficiais com baixa capacidade de suporte e ainda com uma estrutura bastante porosa e colapsível, dificulta o uso de fundações rasas. O colapso do solo constitui um grande perigo em muitas partes do mundo. As atividades humanas continuam crescendo em regiões sustentadas por solos deste tipo, de modo que os riscos que se colocam, e os impactos econômicos estão aumentando tanto em termos relativos quanto absolutos (AYADAT e HANNA, 2013).

Os solos colapsíveis caracterizam-se por apresentarem uma mudança brusca de comportamento quando ocorre infiltração de agentes percolantes. Com o aumento do teor de umidade, ocorre um enfraquecimento dos agentes cimentantes, reduzindo a resistência ao cisalhamento e provocando reduções de volume do solo, quando sob tensão ou não. Essa propriedade, que recebe o nome de colapso, e o solo, com essa característica, de colapsível tem despertado a atenção de inúmeros pesquisadores.

Objetivando minimizar os impactos e contribuir para a conscientização do setor construtivo, pesquisas veem sendo desenvolvidas com o intuito de gerar embasamento técnico que reduzam danos ao homem e ao meio ambiente. Dessa forma, com vistas a uma solução destes problemas, têm-se procurado modificar as propriedades dos solos, usando-se alguns procedimentos com a finalidade de melhorá-los, conforme critérios técnicos e econômicos.

1.2 Justificativa

A reciclagem de RCC é altamente atraente em comparação com o uso de recursos naturais não renováveis, promovendo proteção ambiental e permitindo o desenvolvimento de uma nova matéria-prima. Este material, deriva de novas construções, demolições e reformas de edifícios, obras públicas e outras estruturas. O RCC é heterogêneo em termos de natureza e tamanho. A maioria da fração é constituída de materiais inertes, que responde por 40 a 85 % do volume total de resíduos, excluindo-se solo de escavação (MÁLIA *et al.*, 2013).

Com o surgimento dessas questões algumas soluções passaram a ser vistas como alternativas para a resolução dessas demandas. Diferentes estudos (Santos, 2007; Macedo, 2008; Lira Jr., 2010; Rodrigues, 2011; Macedo, 2013), sobre a avaliação das propriedades e comportamento dos agregados reciclados vêm sendo realizados a partir de diferentes perspectivas, relacionada com a qualidade e a fonte dos resíduos.

Vários países na Europa têm recomendações para a utilização de agregados graúdos reciclados em concretos estruturais, ou não, mas os agregados miúdo reciclado são geralmente descartados porque eles podem produzir modificações nas propriedades do concreto fresco e endurecido (ZEGA, 2011).

O reaproveitamento de RCC, além de proporcionar melhorias do ponto de vista ambiental, é uma alternativa economicamente vantajosa, pois um novo material pode ser criado, agregando valor por ser um produto sustentável e reduzindo assim a exploração de novas jazidas na busca pela utilização de recursos naturais. Para isso usinas de reciclagem vem se instalando em diversos municípios do Brasil. O município de Petrolina - PE conta com uma unidade em operação, com capacidade de processamento de 20 toneladas/hora, onde todos os dias chegam toneladas de resíduos proveniente da coleta pública e descarte de empresas privadas, que

poderiam ser utilizados para reforço de solo, como exemplo pode-se citar para melhoramento de solos colapsíveis, dando outro destino para os resíduos ali beneficiados.

Um outro problema ocasionado em obras de engenharia é a falta de resistência dos solos. Em muitos casos, os solos têm baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade, tornando-se inviável o projeto de fundações superficiais. A solução geralmente empregada para esse tipo de problema são as fundações profundas, porém, são mais caras tornando o custo do imóvel mais onerosos. Uma alternativa para esse problema seria modificar as propriedades geotécnicas do solo, criando um novo material com maior capacidade de suporte e menores deformações.

Uma das técnicas utilizadas para essa alternativa é a possível estabilização granulométrica dos solos, por meio da aplicação de agregados, alterando as características granulométricas (FERREIRA; TOMÉ, 2011). A estabilização de solos é uma técnica relativamente antiga desenvolvida com maior aplicação em pavimentação, porém, tal conjunto de processos tem sido largamente utilizado, não somente na área de pavimentos, mas em diversas outras áreas, como fundações, contenção de taludes e barragens (VENDRUSCOLO, 1996). Assim, a presente pesquisa vem a ser uma alternativa para aplicação prática destes resíduos produzidos no melhoramento de solos colapsíveis no município de Petrolina - PE.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a utilização de Resíduos da Construção Civil (RCC) em diferentes percentuais misturados a um solo colapsível de Petrolina-PE, a fim de se minimizar seu colapso quando inundado.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo proposto, destaca-se os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar de forma física o RCC, o solo colapsível e as misturas em diferentes percentuais de solo e RCC;

- analisar a influência da compactação e seus tipos de curvas no RCC e nas misturas solo/RCC;
- comparar o comportamento de variação de volume devido à inundação obtido por meio de ensaios de laboratório.

1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos citados, fez-se necessário a realização de uma série de atividades, conforme descritas resumidamente a seguir:

- i) coleta de amostra de RCC, oriundos de atividades da Construção Civil em um canteiro de obra, que se encontrava em fase de elevação de alvenaria localizado na cidade de Recife-PE;
- ii) coleta de solo colapsível proveniente do município de Petrolina – PE, localizado a 721quilômetros da cidade do Recife – PE;
- iii) caracterização do RCC bruto coletado, por meio de separação tátil-visual dos seus constituintes, ou seja, ensaio de composição gravimétrica;
- iv) beneficiamento dos RCC (Classe A), para fins de redução do tamanho das partículas e, conseqüentemente, obtenção de agregados reciclados, realizado no Laboratório Avançado de Construção Civil – LACC da Escola Politécnica de Pernambuco, a partir de um equipamento britador de mandíbulas;
- v) definição dos percentuais de RCC acrescentados na mistura solo/RCC a serem analisadas;
- vi) execução de ensaios de caracterização física, tais como granulometria, densidade real, compactação, limites de consistência, e de ensaios de caracterização mecânica, edométricos convencionais simples e duplo, para conhecer as propriedades dos materiais investigados, de acordo com as normas da ABNT;
- vii) análise e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório e comparação com dados da literatura.

1.5 Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em 5 capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 consiste de uma INTRODUÇÃO, na qual se apresentam uma contextualização do tema de modo mais abrangente, os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa, metodologia e a sua organização.

O Capítulo 2 apresenta um REFERENCIAL TEÓRICO, em que se aborda os principais temas direcionados a sustentabilidade, resíduos da construção civil, abordando sua definição, classificação, legislação pertinente e as alternativas para sua reutilização. Como também, o conceito de solos colapsíveis, suas áreas de ocorrência, danos ocasionados e também, algumas considerações relativas a técnicas de estabilização de solos.

No Capítulo 3 são apresentados os MATERIAIS E MÉTODOS, descrevendo a parte prática da pesquisa realizada, apresentando a caracterização do local da coleta do solo e do RCC, os materiais utilizados, métodos empregados, dentre outros.

No Capítulo 4 são expostas a APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS, que apresenta de forma detalhada os dados obtidos nos ensaios, avaliando-se os materiais individualmente, assim como o comportamento do solo com a inclusão de RCC.

No Capítulo 5, são apresentadas as CONCLUSÕES e SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os dois temas norteadores desta pesquisa. No primeiro, resíduos da construção civil, onde será abordado o desenvolvimento sustentável na construção civil, sua definição, classificação, legislação pertinente e as alternativas para sua reciclagem e reutilização. No segundo, solo colapsível, onde são apresentadas sua definição, suas características, áreas de ocorrências, danos ocasionados e também, algumas considerações relativas a técnicas de estabilização de solos.

2.1 Resíduos da Construção Civil (RCC)

A indústria da construção civil é um dos setores que mais causam impactos ambientais. Apesar de ser reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, a construção civil apresenta-se como grande geradora de impactos ambientais, quer pelo consumo de recursos naturais, quer pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos. O setor, atualmente, tem o desafio de conciliar uma atividade produtiva desse nível com um desenvolvimento sustentável, menos agressivo ao meio ambiente e à sociedade.

Segundo Nagalli (2013), a experiência brasileira na gestão sustentável de RCC apresenta uma série de pontos positivos, incluindo a sistematização de procedimentos, a identificação de responsabilidades, o compartilhamento de tarefas e estabelecimento de punições em caso de não cumprimento da lei, sendo possível afirmar que o cuidado com a gestão de RCC está a melhorar ao longo dos anos.

Com o desenvolvimento tecnológico das indústrias e o aumento da população nos centros urbanos, ocorreu, paralelamente, um aumento crescente da quantidade e diversidade de poluentes ambientais e, conseqüentemente, um comprometimento contínuo da qualidade de vida dos seres vivos no meio ambiente. Surgiu, então, a necessidade de consolidar novos modelos de desenvolvimento, buscando a sustentabilidade por meio de alternativas de utilização dos recursos existentes, orientadas por uma racionalidade ambiental, visando a preservação dos recursos naturais (SILVA, 2014).

Nos últimos anos a indústria da construção civil, em Petrolina, tem se destacado pelo crescimento do número de edificações de múltiplos andares e conjuntos habitacionais para moradias populares. Em 2014, Petrolina contratou cerca de 13 mil moradias, que somam investimentos de R\$ 700 milhões. O município já foi beneficiado com o recebimento de aproximadamente 5 mil casas pelo Programa Minha Casa Minha Vida (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETROLINA, 2014).

Porém, com o desenvolvimento do setor o volume de RCC gerados no município de Petrolina-PE tendeu a aumentar, tornando-se bastante significativo (PINHEIRO, 2006). Visando minimizar o impacto ambiental causado pelo alto volume de RCC e reaproveitar esses resíduos na fabricação de produtos para a construção civil, bem como gerar emprego e renda para a população carente. A prefeitura do município em conjunto com o Ministério da Ciência e Tecnologia do Governo Federal em 2005, construiu a Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina que possui em suas instalações a UBE (Usina de Beneficiamento de Entulho), com capacidade de processamento de 20 toneladas/hora e valor total orçado em R\$ 1.252.661,56 (um milhão, duzentos e cinquenta e dois mil, seiscentos e sessenta e um reais e cinquenta e seis centavos) (PREFEITURA MUNICIPAL DE PETROLINA, 2005).

A unidade consiste em um maquinário capaz de transformar o entulho em quatro granulométricas diferentes. Após o processo, os materiais podem ser integrados aos materiais de construção. Para a obtenção do material a CTR Petrolina desenvolve junto à Prefeitura de Petrolina, o programa de recolhimento de entulho na cidade. Este consiste na disponibilidade de caixas estacionárias que são colocadas em locais previamente definidos através de solicitações da comunidade em geral. Os resíduos da construção são dispostos nessas caixas e direcionados à CTR Petrolina para então serem beneficiado, contribuindo assim para melhoria da qualidade do meio ambiente.

2.1.1 Definição

O Resíduo da Construção Civil (RCC) ou Resíduo da Construção e Demolição (RCD) pode ser definido como todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição em obras de construção civil, como prédios, residências e obras de infraestrutura. São comumente chamado de caliça, metralha ou entulho. É composto por fragmentos ou restos

de tijolo, concreto, solo, argamassa, aço, madeira, gesso, plástico, madeiras, tintas, entre outros, provenientes do desperdício.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 307 de cinco de julho de 2002, em seu Art. 2º define: Resíduos da construção civil; Geradores; Transportadores; Agregado reciclado; Gerenciamento de resíduos; Reutilização; Reciclagem; Beneficiamento; Aterro de resíduos da construção civil e as Áreas de destinação de resíduos (CONAMA,2002).

2.1.2 Classificação

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002, os resíduos podem ser Classe A os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Classe B, os resíduos recicláveis para outras destinações; Classe C, os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a reciclagem ou recuperação; e Classe D, resíduos perigosos oriundos do processo de construção.

Já a legislação acerca de resíduos sólidos no Brasil, regulamentada pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004), considera os resíduos em duas classes:

- a) resíduos Classe I - Perigosos: apresentam características tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade entre outros, que possam representar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando gerenciado de forma inadequada;
- b) resíduos Classe II – Não perigosos. São divididos em:
 - resíduos classe II A – Não inertes. São aqueles que não se enquadram nem nos resíduos de classe I, tampouco no de classe II B. Podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - resíduos classe II B – Inertes. Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007/04, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006/04, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.1.3 Aspectos na Engenharia Civil

O setor da Engenharia Civil vem buscando alternativas para minimizar os impactos ao meio ambiente causados por suas atividades. Nos últimos anos, a rápida industrialização em todo o mundo tem levado ao consumo significativo de agregados naturais, tais como brita e areia que são indispensáveis para a construção. Para tratar dessas questões, muitos estudos vêm sido feitos sobre a viabilidade de materiais, com substituição do agregado natural por agregados reciclados (KIM, 2012).

Os resíduos de construção brasileiros quando bem segregados não representam grandes riscos ambientais em razão de suas características químicas e minerais serem semelhantes aos agregados naturais e solos (KARPINSK *et al.*, 2009). Merino *et al.* (2010) enfatiza que o setor da construção se tornou cada vez mais consciente da importância dos impactos ambientais associados aos resíduos gerados durante a construção de novos edifícios e a demolição das velhas estruturas.

Saez (2011) enfoca que o problema da geração de resíduos vem também do sistema de coleta de resíduos utilizados na construção civil, que como é feito de forma descentralizada por cada empresa subcontratada, os gestores não estão familiarizados com a quantidade de resíduos gerados em um projeto de construção. Isso significa que o princípio da redução do desperdício não é aplicado na prática, não é considerado como uma atividade no planejamento da obra.

Com isso, tem-se ainda o acondicionamento inadequado dos resíduos da construção que acarreta em uma gama de impactos ambientais, como a poluição visual, o estreitamento de leitos e valetas, ocasionando enchentes, poluição das águas e solos, indução a deposição de outros tipos de rejeitos e atrativo para vetores de doenças.

Um estudo realizado por Chen *et al.* (2002), mostra que dos diversos materiais utilizados na construção de um empreendimento em diferentes países, em torno de 10% a 30% se tornam resíduos, mostrando que o setor ainda se encontra distante se comparado com outros setores industriais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Taxa média de desperdício de materiais de construção em obras.

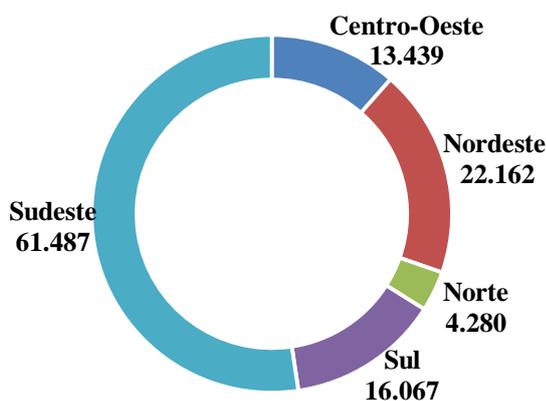
Material	Desperdício médio (%)					
	USA	UK	Mainland (China)	Brasil	Seoul	Hong Kong
Tijolos/blocos	3,5	4,5	2,0	17,5	3,0	--
Concreto	7,5	2,5	2,5	7,0	1,5	6,7
Drywall	7,5	5,0	-	-	-	9,0
Fôrmas	10,0	-	7,5	-	16,7	4,6
Vidro	-	-	0,8	-	6,0	2,3
Argamassa	3,5	-	5,0	46,0	0,3	3,2
Prego	5,0	-	-	-	-	-
Vergalhões	5,0	-	3,0	21,0	0	8,0
Telha	6,5	5,0	-	8,0	2,5	6,3
Papel de parede	10,0	-	-	-	11,0	-
Madeira	16,5	6,0	-	32,0	13,0	45,0

Fonte: Chen *et al.* (2002).

O estudo de Fonseca (2012) revela que nas cidades brasileiras de médio porte, o RCC representa de 41 a 71% do total dos resíduos sólidos urbanos gerados e, em Brasília, o valor do RCC atinge cerca de 70%. Lopes (2007) mostra que em Fortaleza/CE, este valor atinge cerca de 30%, sendo o RCC oriundo dos canteiros de obras da cidade. Em Petrolina/PE, 48,67% de RCC são gerados no município (SANTOS, 2008).

Em estudo realizado em 2013 pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) e o IBGE revelou que os municípios coletaram mais, o que implica no aumento de 4,6%, em relação ao ano anterior, como mostra a Figura 1 por regiões. Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final dado aos RCC, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2014).

Figura 1 - RCC Coletados nas Regiões do Brasil - ton/dia.



Fonte: ABRELPE (2014).

Paz *et al.* (2013) após realização de projeção da população brasileira para o ano de 2013, obteve uma média de geração diária de RCC de 250,5 t/dia. Dessa forma, a geração de RCC estimada para o Brasil em 2013 foi em torno de 92 milhões de t/ano.

Em dados do grupo de pesquisa de Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente da Universidade de Pernambuco (AMBITEC/UPE/POLI), a geração de RCC na Região Metropolitana do Recife (RMR) alcançou o valor entre 4.000 e 4.500 mil t/dia (FALCÃO, 2014). Considerando-se que o mês possui 26 dias úteis, encontra-se uma quantidade mensal de 104 mil toneladas que, multiplicado pelos 12 meses do ano, totaliza 1.248.000 t/ano.

Portanto, com relação à atuação da engenharia, esta deve mitigar os ataques que vem cometendo ao meio ambiente, a partir de pesquisas onde poderão reaproveitar seus resíduos, (SILVA, 2007). Apesar do surgimento de legislações específicas, a taxa de reciclagem de RCC no Brasil ainda é muito baixa, menos que 100 toneladas de RCC processado por dia (CUNHA e MICELI, 2013).

2.1.4 Legislação

Na União Européia (EU), não existe legislação específica para os RCC (APA, 2015). Apesar disso, alguns países da UE tomaram ações espontaneamente, criando várias regulamentações e iniciativas de modo a estimular a correta gestão de RCC. Mália (2010) afirma que ainda existem muitos países dentro do espaço europeu em que a gestão de RCC se encontra numa fase inicial, no caso de Portugal e Espanha, necessitando percorrer um longo caminho até alcançar o êxito dos países com maiores níveis de reaproveitamento como Alemanha, Dinamarca e Holanda.

Assim, seguindo a linha de pensamento adotada até então, focando em aspectos onde enfatiza a redução da utilização de recursos e propicia a aplicação da prática da hierarquia de gestão de resíduos, como mostra a Figura 2. A prevenção à geração dos resíduos deverá constituir a primeira prioridade e a reutilização e reciclagem deverá ter preferência, ao passo que a eliminação é a última e mais indesejável ação (MÁLIA, 2010).

Figura 2 - Hierarquia dos resíduos na Diretiva de Resíduos da UE, de 2008.



Fonte: Balletto (2013).

No Brasil, durante as últimas décadas, muitas regulamentações ambientais têm sido promulgadas a fim de preservar o meio ambiente e garantir uma gestão adequada do RCC. Deu-se início por meio da Resolução CONAMA n° 307 de 5 de julho de 2002, órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, na qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

Oito anos depois, foi regulamentada a Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010, que conduz a Política Nacional de Resíduos Sólidos, com sua última regulamentação, por meio do Decreto Presidencial n° 7.404 de 23 de dezembro de 2010, sendo promovido um novo marco no setor de resíduos de construção, dando nova forças à adequada gestão e reciclagem de RCC.

Além das regulamentações nacionais, diversos municípios possuem legislações municipais específicas. Na cidade do Recife, deu-se início com o Decreto n° 18.082/98, que regulamenta a Lei n° 16.377/98, trata do transporte e da disposição de RCC e outros resíduos que não possuem coleta regular. Dentre os muitos pontos abordados por essa lei, destaca-se a proibição da utilização de áreas de particulares para o destino final dos RCC sem prévia autorização da Empresa Municipal de Limpeza Urbana (EMLURB).

Em 04 de janeiro de 2005 foi elaborada em Recife a Lei n° 17.072, que estabelece as diretrizes e os critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil – PGRSCC, informando as obrigações de cada um dos agentes envolvidos, com o poder público participando como gestor, cumprindo seu papel com relação ao licenciamento de

empreendimentos, no cadastramento de transportadores, na fiscalização dos agentes, na promoção de ações sócio educativas como também prover soluções para os pequenos volumes de RCC.

2.1.5 *Reciclagem de RCC*

A comunidade científica mundial está sendo cada vez mais impulsionada pela necessidade de encontrar soluções para uma série de questões que ameaça o meio ambiente. Desafios estes, que tem recebido muita atenção nos últimos anos e agora são componentes essenciais nas estratégias nacionais e internacionais da ciência e de mecanismos de financiamento (THE ROYAL SOCIETY, 2011).

Pesquisas recentes vêm sendo realizadas para usabilidade do Agregado Miúdo Reciclado (AMR). Soluções para sua aplicabilidade vem surgindo em várias áreas e países, para a realização de um reaproveitamento de forma adequada, devendo-se tomar alguns cuidados, a partir da escolha e separação do material, evitando a presença de impurezas, definição correta para qual atividade este resíduo vai ser utilizado, e execução de ensaios anteriormente a utilização dos mesmos.

O eixo principal desta abordagem é baseada no estabelecimento de uma hierarquia de opções na gestão dos resíduos. Primeiro de tudo, a redução na origem deve ser buscada. Depois da prevenção, a preferência deve ser dada à reutilização, reciclagem e valorização. A disposição final em aterros deve ser sempre evitada. Estes princípios, em conjunto com os novos modelos de desenvolvimento sustentável, são encorajadores para a reutilização destes materiais, a fim de estabelecer uma referência em seu uso para motivar a reciclagem sustentável.

Os agregados reciclados apresentam um custo de produção inferior aos agregados naturais, ficando entre 30% e 50% mais barato que o produto natural (ABRECON, 2015). Miranda *et al.* (2009) afirma que essa economia pode chegar a 40% mais barato que os naturais, considerando uma média de R\$ 21,00/m³ o preço dos reciclados contra R\$ 35,00/m³ dos agregados naturais. Assim, tornando a escolha deste produto um ganho ambiental, uma vez que se deixa de extrair matéria-prima natural e se consome um resíduo.

A taxa de reciclagem de RCC no Brasil, ainda é muito baixa, uma atividade que teve início por órgãos públicos municipais e vem se ampliando com a entrada de empresas privadas no mercado. Atualmente no Brasil, estão em funcionamento 96 usinas licenciadas que juntas estão produzindo, em média, 426.453 m³ de agregados reciclados por ano, sendo que a capacidade máxima instalada é de 908.925 m³ por ano (ABRECON, 2013). Sendo que hoje, o principal mercado é o de obras geotécnicas, com destaque para o uso em base de pavimentos, embora, mesmo nessa aplicação ainda se enfrente consideráveis resistências do mercado (AGOPYAN e JOHN, 2011).

Apesar dos RCC ter grande potencial de reciclagem, apenas uma pequena fração é efetivamente recuperada (ORTIZ *et al.*, 2010). Vários pesquisadores têm buscado estimar a quantidade de RCC gerada em seus países e a quantidade reciclada. A Tabela 2 apresenta as estimativas de geração anual de RCC em alguns países, obtidas em estudos mais recentes.

Tabela 2 - Geração e Reciclagem de RCC em alguns países.

País	Geração de RCC (milhões de toneladas, arredondados)	% Reutilizado ou reciclado	% Incinerados ou depositados em aterro
EU-15	180	28	72
Brasil	92	<5	>95
Alemanha	59	17	83
UK	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	13	<5	>95
Países Baixos	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Áustria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Grécia	2	<5	>95
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55
Irlanda	1	<5	>95

Fonte: Adaptado de Merino *et al.* (2010).

A reutilização e a reciclagem como estratégias de minimização de resíduos oferecem três benefícios: reduzem a procura sobre novos recursos naturais; diminuem a energia necessária para a produção de novos materiais; e usam resíduos que de outra forma teriam o aterro como destino final (MÁLIA, 2010). Taxas de reutilização do RCC acima de 80% já tem sido

alcançada na Holanda, Dinamarca e Alemanha (EUROSTAT, 2009). Apesar disso, a situação da fração fina de RCC é menosprezada, pois apesar de representar de 40 a 60% em massa do resíduo, é rejeitada como resíduo do próprio processo da reciclagem ou utilizada em aplicações de baixo valor agregado (ULSEN, 2011).

Após constatar a instalação de diversas recicladoras no país depois da publicação da resolução CONAMA Nº 307 de 2002, este cenário vem se modificando. Atualmente, segundo a ABRECON (2013), a quantidade de usinas existentes é de pelo menos 310 em todo o país, a sua maioria em fase de instalação. Este crescimento ainda se encontra em ritmo acelerado, sendo causado pelo interesse do setor privado em investir na reciclagem de RCC e que a quantidade de usinas móveis está em franco crescimento, como previsto por MIRANDA *et al.* (2009). Na Alemanha, existem cerca de 3.000 usinas móveis e 1.600 usinas fixas (MUELLER, 2007).

2.2 Alternativas para o Reaproveitamento de RCC

Os danos ao meio ambiente, a escassez de recursos naturais e a abundância de resíduos da construção, altos custo de transporte e os elevados custos para deposição dos resíduos em aterros são fatores que encorajaram o desenvolvimento de pesquisas que propõe uma nova abordagem sobre a sustentabilidade no meio ambiente construído. Existem técnicas largamente difundidas para a utilização dos resíduos de construção, como na confecção de base e sub-base de pavimentos, na produção de concretos sem fins estruturais, na produção de blocos de concreto, dentre outros. O Quadro 1 apresenta algumas pesquisas envolvendo RCC.

Quadro 1 – Estudos com RCC e suas aplicações.

Aplicação	Observação	Fonte
Pavimentação	Viabilidade do agregado reciclado em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e composição do componente.	Costa e Ursella (2003)
Em reforço de solos	Viabilidade em uso de reforço de solos.	Santos (2007)
Em reforço de solo	Viabilidade em uso de reforço de solos.	Macedo (2008)
Construção de via rodoviária.	Comportamento mecânico do agregado reciclado.	Grubba (2009)
Estaca de compactação.	Viabilidade em uso de reforço de solos.	Lira Jr. (2010)
Fabricação de concreto sem função estrutural	Viabilidade em concreto sem função estrutural.	Rodrigues (2011)

Pavimentação	Análise e comportamento do agregado reciclado na execução de camadas de base e sub-base em obras de pavimentação de baixo volume de tráfego.	Proença (2012)
Camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentação	Viabilidade dos agregados reciclados em propriedades de pavimentação analisadas, como forma e composição dos componentes.	Farias (2013)
Execução de pavimentos flexíveis	Viabilidade e comportamento do agregado reciclado na execução de pavimentos flexíveis, do tipo concreto asfáltico usinado a quente.	Brasileiro (2013)
Fabricação de concreto e estabilização de solos	Análise do agregado reciclado para reforço de subleito, para revestimento primário e sub-base.	Sampaio (2013)

Fonte: Adaptado de Proença (2012).

2.2.1 Concreto

Atualmente, uma grande diversidade dos resíduos provenientes das construções e demolições vêm sendo reciclados, porém sua aplicação ainda é restrita, já que exige muitos estudos para sua consolidação. Uma aplicabilidade que se destaca nos trabalhos pesquisados, é a recuperação de agregados reciclados para a substituição de agregados naturais, para serem usados em concreto convencional.

Segundo Tam *et al.* (2009), o concreto com agregados reciclados preenche três requisitos "verdes", tal como estabelecido pela Organização Mundial do Meio Ambiente: pode reciclar e reduzir recursos naturais e consumo de energia; não afetará o ambiente; e pode manter o desenvolvimento sustentável.

Em pesquisa realizada com o uso de agregado incorporado à pasta de cimento para confecção de concreto, Sampaio (2013) realizou uma análise das características mecânicas do resíduo de construção (RCC), da Central de Tratamento de Resíduos de Petrolina/PE. Foram dosados três traços para a produção dos concretos, sendo um traço para o concreto de referência e dois traços para os concretos com substituições das frações miúda do agregado natural por agregado reciclado miúdo nas proporções de 50% e de 100%. A análise dos resultados dos concretos produzidos com resíduos atingiram resistências médias, podendo ser utilizados em concretos sem função estrutural, sendo o valor de f_c aos 28 dias, no Traço 100% de RCC, de 28 MPa, maior que o valor de 27 MPa do concreto de referência, enquanto que o menor valor foi de 24 MPa, no Traço 50% de RCC aos 28 dias (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples aos 28 dias.

	Traço R	Traço 50% RCC	Traço 100% RCC
Média	27,21	24,22	28,94
Desvio padrão	1,28	1,58	1,87
Coef. de variação (COV%)	4,72%	6,51%	6,45%
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa

Fonte: Sampaio (2013).

2.2.2 Blocos de Concreto

Paula (2010) analisou a viabilidade da confecção de blocos com uso de agregados miúdos reciclados, para uso em alvenaria de vedação, e o desempenho dos mesmos diante de blocos com agregados naturais. Os blocos reciclados foram confeccionados utilizando resíduos da usina de beneficiamento do município de Petrolina-PE, utilizando-se um traço padrão 1:6 (cimento: agregado miúdo). Os resultados indicaram que a substituição de 25; 50; 75; e 100% da areia natural por agregados miúdos reciclados não afetou significativamente as propriedades mecânicas dos blocos, cujos valores de resistência chegaram a 3,67 MPa, 2,63MPa, 2,44 MPa e 2,03 MPa, respectivamente. Por outro lado, essa substituição apresentou elevada porosidade, requerendo estudos mais aprofundados.

Amadei (2011) em sua pesquisa produziu e avaliou blocos intertravados de concreto com RCC proveniente do Município de Juranda – PR, onde estabeleceu um traço de referência, ou seja, sem RCC, e, a partir deste, feitas substituições nas proporções de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% do agregado miúdo natural por reciclado. Foram realizados os ensaios que avaliam as propriedades do concreto no estado fresco para todas as diferentes proporções e, no estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, resistência à abrasão e absorção de água. Os ensaios de compressão simples (Tabela 4) apresentaram valores superiores a 15 MPa aos 3 dias de cura, o que viabiliza o transporte desse produto pré-moldado até seu local definitivo já nos primeiros dias (FIORITI, 2007).

Tabela 4 – Resistência à Compressão Simples.

% de Substituição	3 Dias		7 Dias		28 Dias	
	f_c	f_{ck}	f_c	f_{ck}	f_c	f_{ck}
0%	27,082	26,392	31,883	31,408	38,783	38,122
25%	22,644	22,151	25,645	25,051	35,712	35,156
30%	20,107	19,359	23,157	22,264	32,220	31,613
35%	18,832	18,276	23,007	22,175	26,528	25,354
40%	18,319	17,888	22,769	21,864	24,295	22,972
45%	16,819	15,496	20,657	19,786	21,694	20,614
50%	16,332	15,584	19,382	18,280	20,844	20,084

Fonte: Amadei (2011).

O traço com 25% de substituição de agregado miúdo natural por reciclado foi o único que atingiu o parâmetro de utilização determinado pela norma brasileira (NBR 9780/1987), ou seja, acima de 35 MPa aos 28 dias de idade. Entretanto, os traços com 30% e 35% de substituição apresentaram resistências de 31,61 MPa e 25,35 MPa respectivamente, ou seja, superior aos 25MPa com 28 dias, o que, segundo Amadei (2011), são considerados tecnicamente viáveis para serem utilizados em pavimentos com baixas solicitações de tráfego.

Lintz *et al.* (2012) também analisou as propriedades mecânicas de concreto contendo RCC (Figura 3). Foi realizada a substituição dos agregados naturais pelos agregados de mesma granulometria provenientes de RCC, em porcentagens de 0%(E0), 20%(E1), 50%(E2), 80%(E3) e 100%(E4) de RCC, e moldados blocos de concreto.

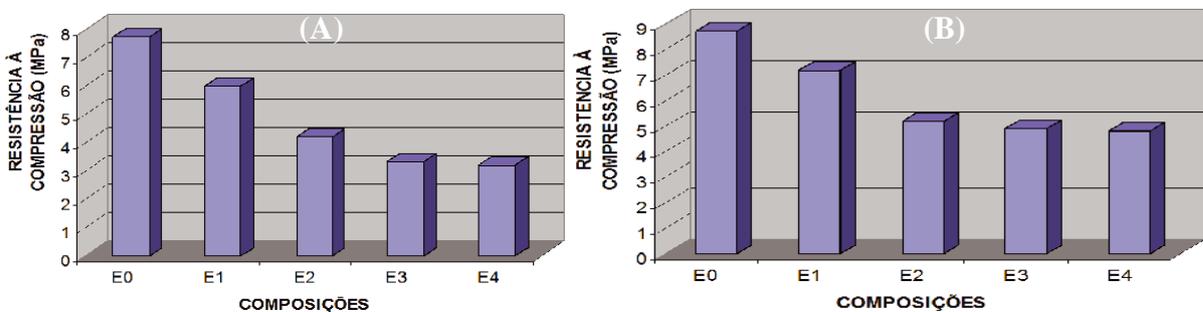
Figura 3 - Blocos fabricados com RCC.



Fonte: Lintz *et al.* (2012).

A Figura 4 mostra os resultados provenientes dos ensaios de compressão dos blocos de concreto, aos 14 e 28 dias. Pode-se observar que, para todas as misturas de concreto utilizadas na fabricação dos blocos os valores de resistência à compressão estão dentro das limitações da norma brasileira para o emprego como elemento de alvenaria (NBR6136/2007). Os blocos executados com os traços de referência E0 e o traço E1, apresentaram resistência acima de 6MPa aos 28 dias, podendo ser classificados na “classe A” (com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima ou abaixo do nível do solo) e os demais traços atendem as características de resistência da “classe B” (com função estrutural, para uso em elementos de alvenaria acima do nível do solo).

Figura 4 - Resultados das resistências à compressão médias. (a) Aos 14 dias. (b) Aos 28 dias.



Fonte: Lintz *et al.* (2012).

Em estudo realizado com RCC para aplicação no desenvolvimento de blocos pré-moldado para alvenaria, Marques e Santos (2013) passaram o RCC por alguns processos de produção como trituração e moagem, após sua coleta. Os agregados miúdos reciclados foram separados por peneiramento e classificados de acordo com a granulometria desejada. O traço utilizado baseado na maior massa unitária compacta, proporcionou o menor índice de vazio. A melhor proporção foi 20% de pó de pedra e 80 % de agregado de resíduo de construção (RCC).

Os autores avaliaram, que nos resultados alcançados, os blocos estão de acordo com o mínimo exigido pela norma NBR 12118/2010, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Resultado do ensaio de resistência mecânica à compressão axial.

Traço	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à compressão mínima		
	14 dias	21 dias	28 dias	Bloco de concreto (NBR 6136 e NBR 12118) 2,0Mpa	Bloco cerâmico (NBR 15270-1) 1,5Mpa	Bloco de solo-cimento (NBR 8491) 2,0 MPa
1:9	2,0	2,6	3,5			

Fonte: Marques e Santos (2013).

As pesquisas vêm evidenciado a viabilidade da produção de blocos pré-moldados com agregado de RCC, mas ainda há uma necessidade de compreender alguns fatores a fim de otimizar a produção. Fatores como o agregado com argamassa aderida, que interfere na relação água/cimento, e o tipo e qualidade do agregado, vão afetar diretamente nas propriedades mecânicas dos blocos de concreto.

2.2.3 Pavimentação

O emprego de agregados reciclados como componentes básicos de pavimentação em estradas é uma alternativa tecnologicamente consolidada em pesquisas com aplicação prática realizadas por diversos autores (Fujii, 2012; Silva, 2012; Jimenez *et al.* 2012, Proença, 2012; Farias, 2013; Simas *et al.* 2013). Eles vêm analisando o uso de RCC como alternativa ambientalmente correta para seu uso.

Países europeus e os Estado Unidos criaram suas próprias especificações para controle de produção e aplicação de tais materiais, sendo assim, fazem uso de reciclados devido às boas propriedades e também pelo baixo custo tanto de produção como de execução da obra. No Brasil, também existem pesquisas e relatos da utilização de agregados reciclados dos mais variados tipos como componente de revestimento primário, de base, reforço de subleito e sub-base, proporcionando bons resultados no produto final, como mostram os comentários a seguir.

Fujii (2012), em estudo para a incorporação de RCC em camadas de pavimentação, constatou uma significativa melhora (5%) do comportamento mecânico e estrutural do solo quanto a incorporação do RCC nas camadas que compõem a estrutura do pavimento. O autor defende que a redução de custos de componentes contendo o agregado obtido dos descartes também é possível, influenciando toda a cadeia da indústria da construção civil em sua utilização.

A fim de identificar alternativas para uso de RCC, Farias (2013) analisou a viabilidade técnica do uso de resíduos originados pela atividade de fundações profundas (estacas tipo hélice contínua) e pela demolição de antigas construções para aplicação em camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentação, por meio de ensaios laboratoriais e de campo em um trecho experimental (Figura 5).

Figura 5 – Execução do trecho experimental com RCC.



Fonte: Farias (2013).

Dos dados obtidos em laboratório, identificou-se a melhoria nas propriedades físicas e mecânicas após a mistura realizada entre os materiais investigados, destacando-se as dosagens com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCC beneficiado, com Índices de Suporte Califórnia (ISC) máximos de 125% e 138%, respectivamente, e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCC beneficiado, o qual obteve um ISC máximo de 124%. Pode-se ressaltar que a análise por meio de cenários hipotéticos, permitiu identificar a possibilidade de minimização de cerca R\$ 4,6 milhões de reais dos custos ao se utilizar todo o resíduo beneficiado e o solo proveniente do estaqueamento gerado na obra.

2.3 Solos Colapsíveis

2.3.1 Definição

Alguns solos apresentam comportamento particularizado quando submetidos a determinadas condições de umidade, dentre eles, destacam-se os solos colapsíveis. Esses solos, ao sofrerem inundação e estando sob a ação ou não de sobrecarga, sofrem uma brusca e significativa redução do volume.

Alguns autores empregam o termo colapso para toda redução de volume do solo em um período de tempo tal que afete a estrutura sobre ele construída, afirmando que o diferencial do colapso é que sua redução de volume é rápida e total, enquanto no recalque a redução volumétrica normalmente é progressiva. Todo colapso envolve uma redução de volume, porém nem toda redução de volume é devida ao colapso. Reginatto e Ferrero (1973) definem solos

verdadeiramente colapsíveis como aqueles solos que quando saturados não suportarão as camadas de solo acima e solos condicionalmente colapsíveis como aqueles solos que quando saturados suportarão um certo valor de sobrecarga.

A definição de colapso apresentada no Congresso Anual da ASCE (American Society of Civil Engineering), realizado na Filadélfia (E.U.A.), em 1976, citado por CLEMENCE e FINBARR (1981), diz que solos colapsíveis ou metaestáveis são solos não saturados que experimentam um rearranjo radical de partículas e grande redução de volume quando inundados com ou sem carga adicional. Esta definição refere-se ao comportamento de colapso por aumento de grau de saturação, que será estudado neste trabalho.

Vários fatores influenciam a colapsibilidade dos solos, entre eles a estrutura, o peso específico aparente seco, a umidade, a composição química do permeante, o mineral argílico, a velocidade de inundação, a tensão vertical de inundação, a trajetória de tensões (FERREIRA, 2008).

Rodrigues e Vilar (2013) ressaltam que tal problema pode ser responsável por recalques (deslocamentos verticais) em obras civis, ocasionando desde pequenos danos, como o aparecimento de pequenas trincas em paredes, a danos de maior magnitude, como ruína parcial ou total de paredes, pisos e instalações hidráulicas.

2.3.2 Características do solo colapsível

Segundo Diniz e Santoro (2004), um solo colapsível apresenta, em sua condição natural, elevada porosidade (acima de 40%) e baixo teor de umidade. Essa estrutura porosa geralmente está associada à presença de agentes cimentantes, como óxidos ou hidróxidos de ferro e de alumínio e carbonatos. À cimentação, acompanhada a uma sucção elevada, atribui ao solo uma resistência aparente ou temporária, que pode ser destruída com a inundação, levando o solo a um colapso estrutural (AGNELLI e ALBIERO, 1997). Um resumo das principais características de solo colapsível pode ser observada no Quadro 3.

Quadro 3 - Características de um Solo colapsível.

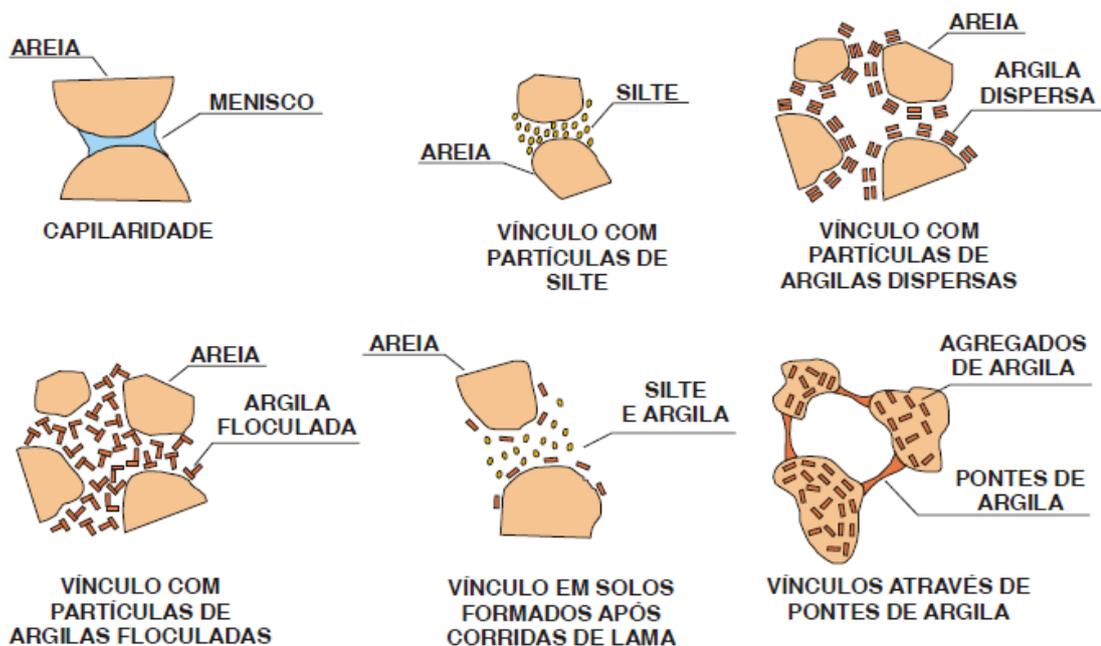
SOLOS COLAPSÍVEIS
Solos não saturados
Áreas onde a evapotranspiração excede a precipitação
Estrutura porosa

Possuem partículas interligadas por argila, óxido de ferro, alumínio ou carbonatos
São solos de origem recente e de fácil drenagem
Oriundos de regiões tropicais úmidas com lixiviação dos horizontes superficiais
Regiões de alternância de estações secas e chuvas intensas e concentradas

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2008).

Dudley (1970) e Clemencee Finbarr (1981) apresentaram diferentes modelos nos quais a instabilidade da estrutura se apresenta de diferentes formas. A estrutura macroporosa é mantida pela falsa coesão advinda da tensão capilar, de forças eletromagnéticas na superfície, a partir de vínculos de silte, de argila e de outros cimentantes como óxido de ferro, carbonatos e sais solúveis. A Figura 6 exibe os modelos instáveis da estrutura do solo, conforme estabelecido pelos pesquisadores citados. O colapso ocorre devido à destruição dos meniscos capilares, responsáveis pela tensão de sucção, ou a um amolecimento do cimento natural que mantinha as partículas e as agregações de partículas unidas (PINTO, 2002).

Figura 6 - Modelos de estruturas instáveis de solos colapsíveis.

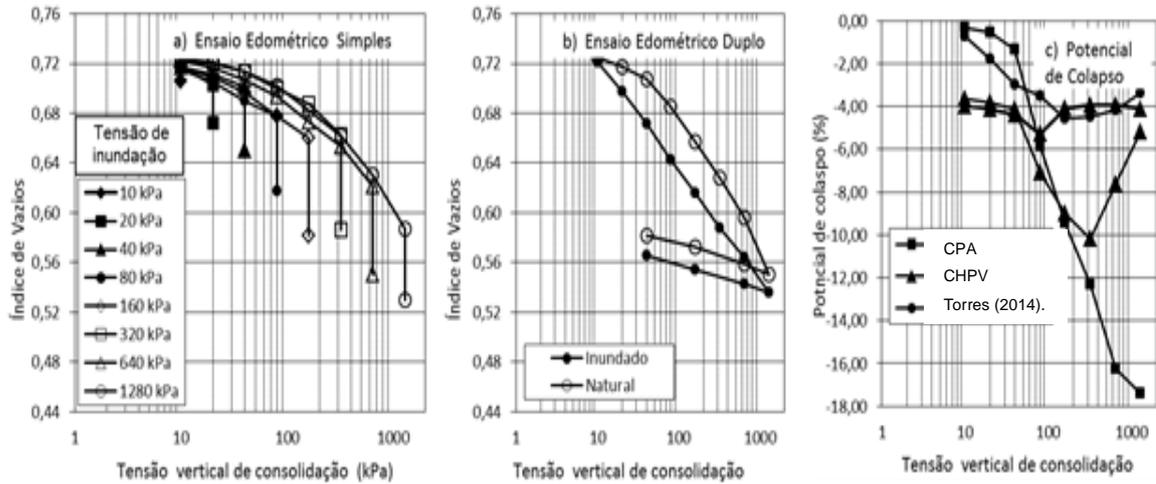


Fonte: Adaptado de DUDLEY (1970) e CLEMENCE & FINBARR (1981) *apud* FERREIRA (1995).

A característica de colapsibilidade de um solo é geralmente estudada a partir de ensaios de compressão edométrica (Figura 7). O valor do recalque resultante do umedecimento depende

do estado de umidade em que se encontra o solo e também do estado de tensões a que está submetido.

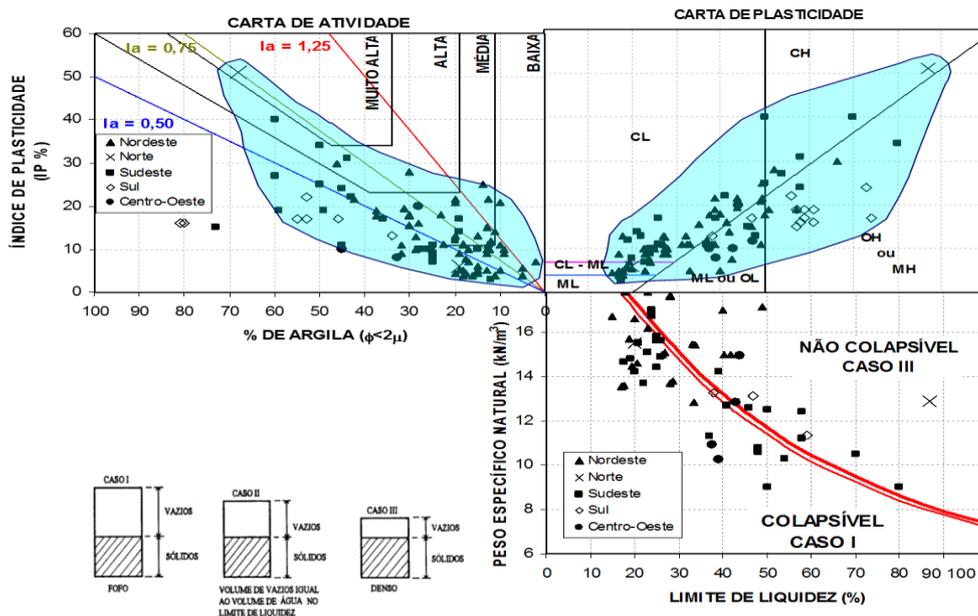
Figura 7–Exemplo de ensaio edométrico simples e duplo.



Fonte: Torres (2014).

Nos solos colapsíveis do Brasil, os valores dos Limites de Liquidez (W_L) e Índice de Plasticidade (IP) estão situados no entorno da Linha - A da Carta de Plasticidade, (Figura 8). Na Região Sul preponderam solos com $W_L > 50\%$, portanto a direita da Linha-B e os da Região Nordeste estão à esquerda da Linha-B, com $W_L < 50\%$. A atividade (Ia) varia de baixa a média. Muitos solos colapsíveis da Região Nordeste e Sudeste foram classificados como não colapsíveis, no critério de Gibbs e Bara (1967), conforme Ferreira (2008).

Figura 8 - Solos Colapsíveis no Brasil - Carta de Plasticidade / Diagrama de Van Der Merve (1964) / Critério de Gibbs e Bara (1967).

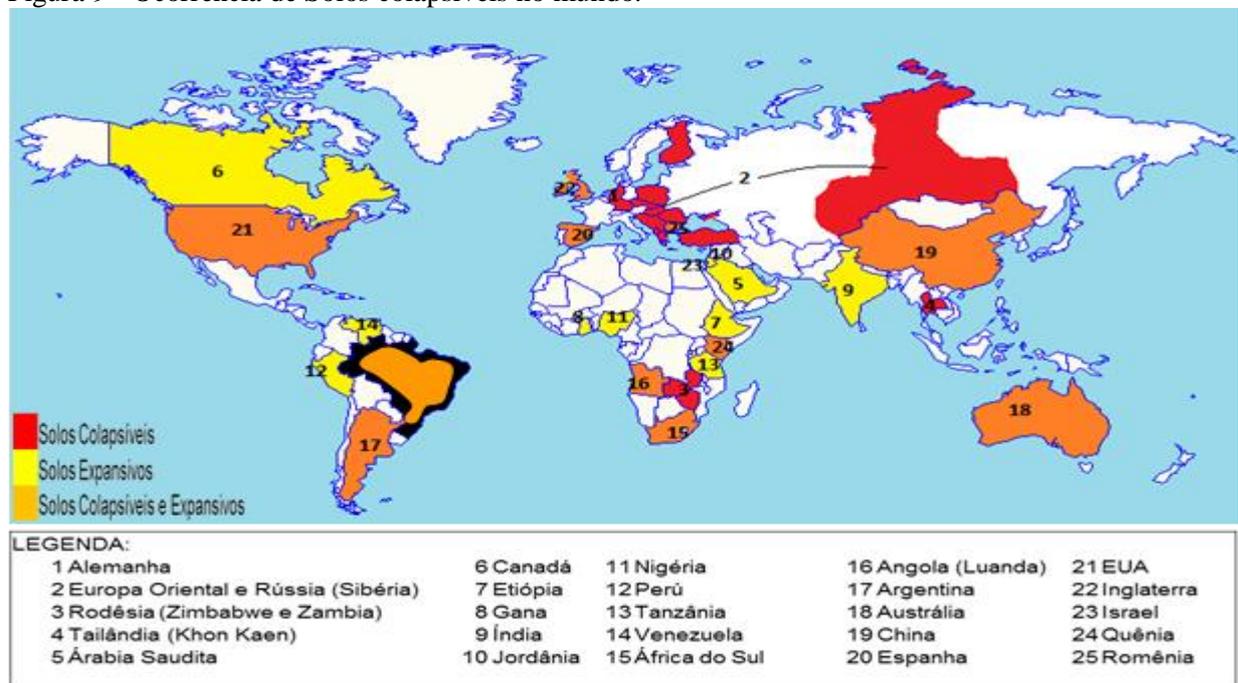


Fonte: Ferreira (2008).

2.3.3 Ocorrência de solos colapsíveis

Determinadas regiões no mundo apresentam condições para o desenvolvimento de solos colapsíveis (Figura 9). Seja pela lixiviação de finos dos horizontes superficiais nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas, o que origina solos de elevada porosidade, como ocorre no Centro-Sul do Brasil, ou pelos solos com deficiência de umidade que se desenvolvem em regiões áridas e semiáridas (VILLAR *et al.*, 1981 *apud* RODRIGUES e VILAR, 2013).

Figura 9 - Ocorrência de Solos colapsíveis no mundo.



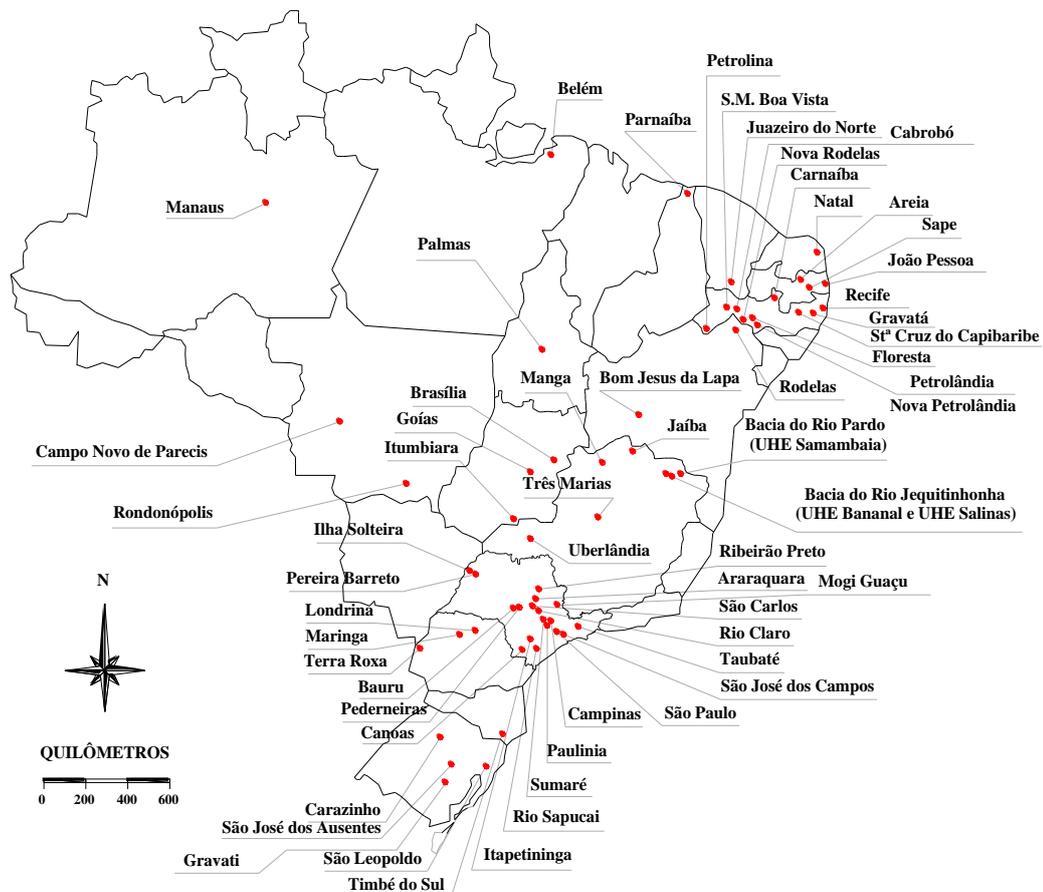
Fonte: Victor e Veras (2010).

A busca para mapear os solos colapsíveis pelo mundo tem sido uma tarefa intensa para muitos pesquisadores, especialmente para aqueles que diretamente têm seus trabalhos influenciados por estes tipos de solos.

Ferreira (1995) lista, além dos Estados Unidos, Espanha e Reino Unido, a presença destes solos em Angola, Etiópia, Gana, Quênia, Nigéria, África do Sul, Tanzânia, Zíbia, Canadá, Argentina, Peru, Venezuela, Austrália, China, Índia, Romênia, Israel, Jordânia e Arábia Saudita. Além destes países, Chen (1975) cita, dentre outros, Cuba, Iran, México, Marrocos e Turquia. Além destes, menciona também França, países baixos, Alemanha, Sibéria, China, Nova Zelândia e Uruguai.

Segundo Ferreira (2008), os solos colapsíveis no Brasil, são geralmente constituídos por alúvios, colúvios e até solos residuais que passaram por intensa lixiviação. Cujas ocorrências vem sendo verificadas em todas as regiões do Brasil. Já foram encontrados solos colapsíveis em vários estados: Amazonas, Pará, Tocantins, Piauí, Pernambuco, Paraíba, Bahia, Brasília, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul. A Figura 10 ilustra os locais de ocorrências de solos colapsíveis no país, citadas da literatura.

Figura 10 - Solos Colapsíveis estudados no Brasil.

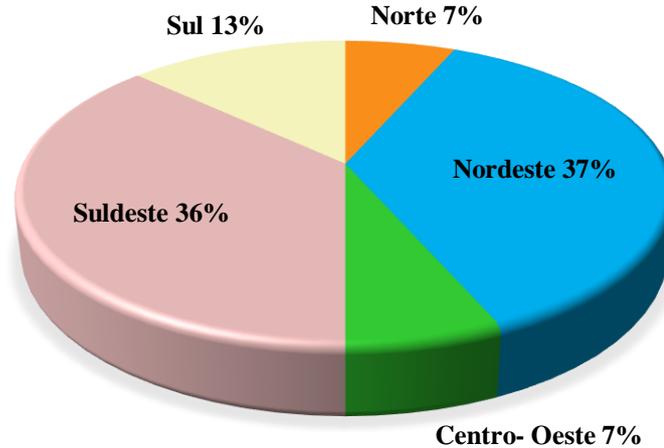


Fonte: Adaptado de Ferreira (2008) e Rodrigues e Villar (2013).

Região Norte: Manaus-AM, (Dias e Gonzales 1985), Belém-PA (Santos Filho *et al* 2005), Palmas-TO, (Ferreira *et al* 2002). **Região Nordeste:** Parnaíba-PI (Riani e Barbosa 1989), Natal-RN (Santos Júnior e Araújo 1999), João Pessoa-PB, Sape - PB, Areia-PB (Martins *et al* 2004), Recife-PE (Ferreira 1997), Gravatá-PE, Carnaíba-PE e Petrolândia-PE (Ferreira 1989), Cabrobó-PE (Ferreira 2007), Sta M B Vista-PE, Petrolina-PE, Rodelas-BA (Ferreira 1989), Bom Jesus da Lapa-BA (Mendonça 1990). **Região Centro Oeste:** Brasília-DF (Paixão e Carvalho 1994 e Guimarães *et al* 2002), Goiás-GO (Moraes *et al* 1994), Itumbiara-GO (Ferreira *et al* 1989). **Região Sudeste:** Jaíba-MG (Ferreira *et al* 1989), Manga - MG Bevenuto 1982), Três Marias-MG, Uberlândia-MG (Ferreira *et al* 1989), e Ilha Solteira-SP (Ferreira *et al* 1989 e Rodrigues e Lollo 2002), Pereira Barreto-SP (Ferreira *et al* 1989), Bauru-SP (Ferreira *et al* 1989), São Carlos-SP (Vilar *et al* 1981, Ferreira *et al* 1989), Sumaré e Paulínia-SP, Mogi Guaçu-SP (Ferreira *et al* 1989), Campinas - SP, (Albuquerque 2006), Itapetininga-SP, Canoas-SP, Rio Sapucaí-SP e São J. dos Campos - SP (Ferreira *et al* 1989); São Paulo-SP, (Ferreira *et al* 1989). **Região Sul:** Maringá-PR (Gutierrez *et al* 2004), Londrina-PR (Teixeira *et al* 2004, Miguel e Belicanta 2004 e Gonçalves *et al* 2006), Timbé do Sul-SC (Feuerhaumel *et al* 2004), São Leopoldo-RS (Martins *et al* 2002), São José dos Ausentes-RS (Feuerhaumel *et al* (2004) e Gravati-RS (Dias 1989).

Destes locais, 6,5% encontram-se nas Regiões Norte e Centro-Oeste, 37% nas Regiões Nordeste e Sudeste e 13% na Região Sul, como ilustrado na Figura 11.

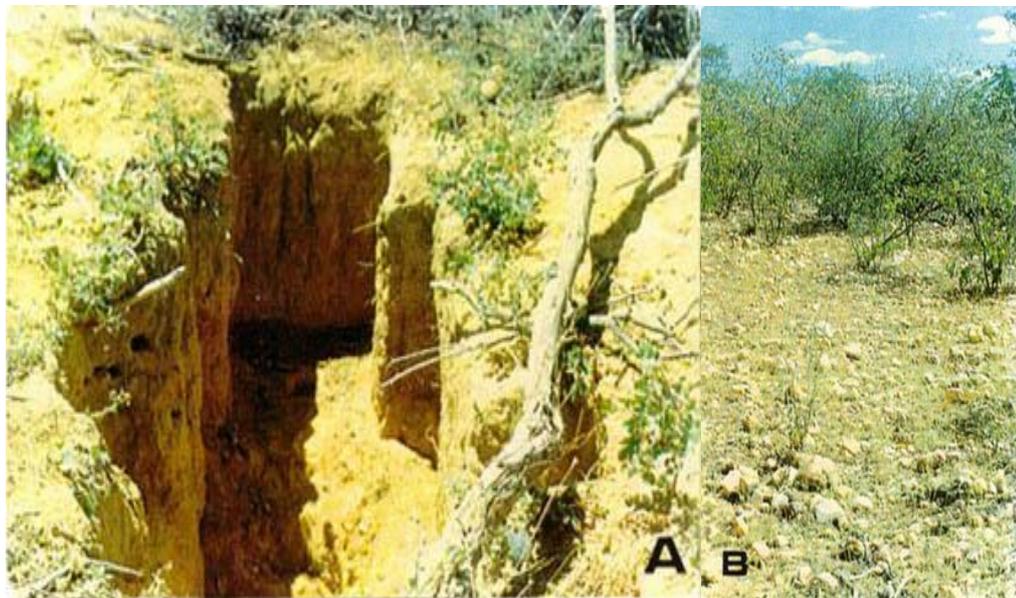
Figura 11 - Ocorrência nas regiões do Brasil (Publicadas).



Fonte: Ferreira (2008).

Os condicionantes climatológicos do Nordeste Brasileiro propiciam a formação de solos potencialmente colapsíveis, principalmente aqueles inseridos em áreas áridas e semiáridas. A Figura 12 apresenta um solo colapsível no município de Santa Maria da Boa Vista - PE.

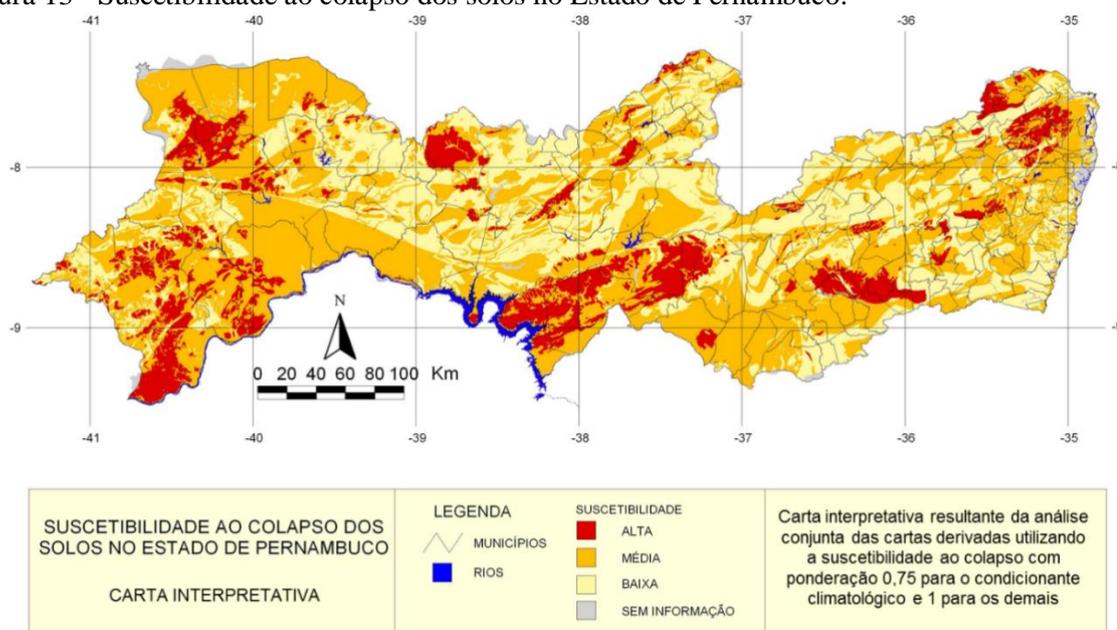
Figura 12 - Solos colapsíveis.



Fonte: Torres (2014).

Em estudo realizado por Ferreira (2008), em que foram analisados os aspectos Pedológicos e Geológicos dos solos no estado de Pernambuco, os resultados mostram uma suscetibilidade ao colapso alta em 13% da área, média em 49,8% e baixa em 33,6% em área, como ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Suscetibilidade ao colapso dos solos no Estado de Pernambuco.



Fonte: Amorim (2004).

Em consequência, fundações executadas em solos colapsíveis podem se comportar satisfatoriamente bem por algum tempo, mas podem sofrer bruscamente um recalque diferencial considerável, por causa do aparecimento acidental de uma fonte de água ou também ocorrer em época de chuvas intensas, vindo assim a provocar o recalque da edificação.

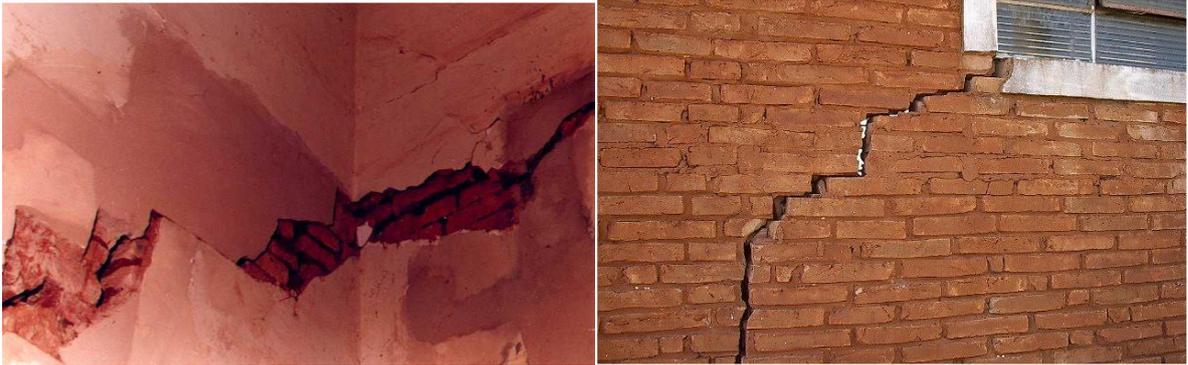
2.3.4 Problemas ocasionados por solos colapsíveis

Os solos colapsíveis se caracterizam por apresentarem uma mudança brusca de comportamento quando ocorre infiltração de água no solo. Com o aumento do teor de umidade, ocorre um enfraquecimento dos agentes cimentantes, reduzindo a resistência ao cisalhamento e provocando reduções de volume do solo, quando sob tensão. Essa condição, chega a se constituir em um grave problema para a estabilidade e a integridade de obras civis, principalmente as de médio e de pequeno porte, para os quais soluções mitigadoras se tornam caras e inviáveis, considerando o poder aquisitivo de grande parte da população afetada (LOBO *et al.*, 2003).

Em zonas urbanas, o colapso dos solos normalmente está associado a chuvas intensas ou de longa duração e a rompimentos de tubulações enterradas de água e de esgoto doméstico (RODRIGUES e VILAR, 2013). O colapso é por implicação instantâneo e de magnitude significativa; não é um recalque imediato. Geralmente ocorre como resultado do crescimento

do teor de umidade e assim a expulsão do ar da estrutura do solo colapsível, em lugar de uma expulsão da água (MAHLER, 1994). Esse enfraquecimento e redução quanto à capacidade de carga de fundações diretas e de estacas curtas, resulta em indesejáveis recalques causadores dos sérios danos ocorridos em edifícios, barragens e diversos outros tipos de obras, conforme os relatos apresentados na literatura geotécnica (Figura 14).

Figura 14 -Danos ocasionados por construções assentadas em solos colapsíveis.

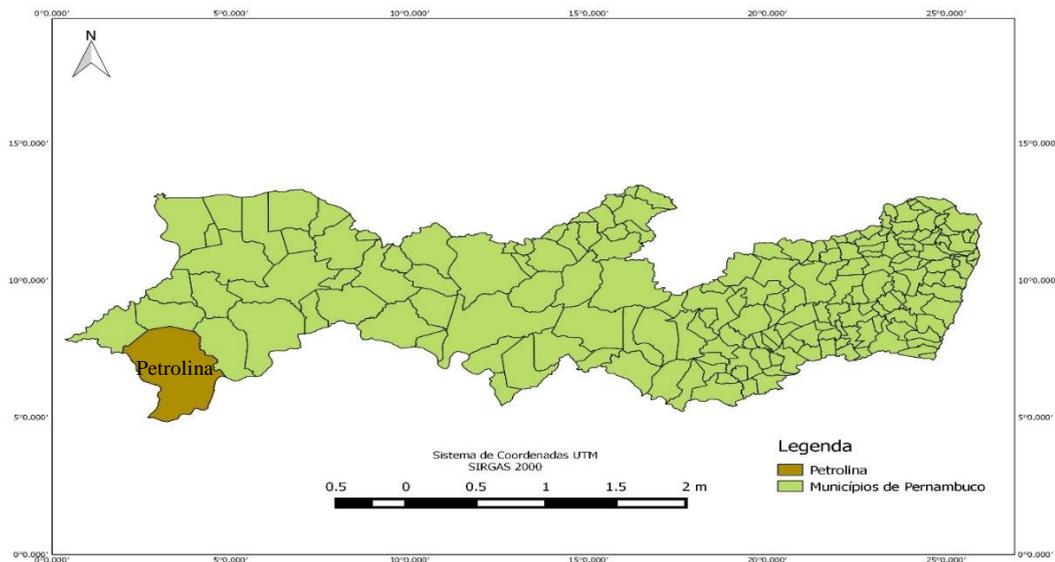


Fonte: Rodrigues, (2007).

2.4 Características socioeconômicas e fisiográficas do município de Petrolina

O solo estudado é proveniente do município de Petrolina, que hoje é um importante centro de desenvolvimento socioeconômico de Pernambuco. Localizada no sertão Pernambucano, mais precisamente no sertão do São Francisco sob a Latitude e Longitude: 0923'55" Sul, 40 30'03" Oeste, limitando-se a norte com Dormentes, a sul com Estado da Bahia, a leste com Lagoa Grande, e a oeste com Estado da Bahia e Afrânio, Petrolina é a maior cidade no sertão do estado (Figura 15).

Figura 15 - Município de Petrolina.



Petrolina se encontra a 722 km da capital, cujo acesso é feito pela BR-232/110; PE-360; e BR-316/428/122. O município ocupa uma área de 4.561,872 km², que representa 4,81% do estado, com uma população estimada para 2014 de 326.017 habitantes, densidade demográfica de 64,44 (hab/km²) e um PIB a preços correntes de R\$ 3,786 bilhões (IBGE,2014). Alguns aspectos são destacados abaixo:

- **Vegetação:** A vegetação é essencialmente formada por Caatinga Hiperxerófila com trechos de Floresta Caducifólia.
- **Clima:** Tropical Semi-Árido, com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril. A temperatura média anual é de 26°C.
- **Relevo:** O município de Petrolina, está inserido na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, que representa a paisagem típica do semi-árido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave-ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Elevações residuais, cristas e/ou outeiros pontuam a linha do horizonte. Esses relevos isolados testemunham os ciclos intensos de erosão que atingiram grande parte do sertão nordestino.
- **Solo:** O município de Petrolina é constituído pelos litotipos do Complexo Gnáissico-migmatito Sobradinho/Remanso, do Greenstone Belt Rio Salitre, do Complexo Saúde, dos Granitóides Sim e Pós-Tectônicos, das formações Mandacaru 1e2, do Grupo Casa nova, da Suíte Metaluminosa e Peraluminosa Rajada, dos depósitos Dentríticos e/ou Lateríticos, Colúvioeluviais e Aluvionares e das Paleodunas Continentais. Com respeito aos solos, nos Patamares Compridos e Baixas Vertentes do relevo suave ondulado ocorrem os Planossolos, mal drenados, fertilidade natural média e problemas de sais; Topos e Altas Vertentes, os solos Brunos não Cálcicos, rasos e fertilidade natural alta; Topos e Altas Vertentes do relevo ondulado ocorrem os Podzólicos, drenados e fertilidade natural média e as Elevações Residuais com os solos Litólicos, rasos, pedregosos e fertilidade natural média.

Com isso, a cidade tem-se destacado na produção de frutas para abastecimento do mercado interno, bem como para exportação. Com bons solos e abundância de recursos hídricos para irrigação. São mais de 70 mil ha irrigados (com capacidade para 200 mil irrigáveis), com insolação de 3.000 horas/ano. Segundo dados do IBGE (2012), Petrolina é a segunda maior

produtora de uvas do país. Já com relação às cidades do estado de Pernambuco, Petrolina é a maior produtora de uvas, manga e goiaba.

Com essa transformação socioeconômica, a cidade tem vivido também, crescimento do setor imobiliário, principalmente depois da criação do Programa Habitacional Popular – Minha Casa Minha Vida– PMCMV que tem como objetivo atender as necessidades de habitação da população de baixa renda nas áreas urbanas, garantindo o acesso à moradia digna com padrões mínimos de sustentabilidade, segurança e habitabilidade.

Com ações de incentivo a novas infraestruturas, problemas vem sendo encontrados em obras assentadas em solos colapsíveis na região, como é o caso da implantação de três grandes obras de engenharia. Na primeira, os solos foram identificados na construção do Conjunto Habitacional Massangana (CHM), onde foram construídas 1.200 casas nas quais cerca de 50 % apresentaram problemas de fissuras e trincas, ARAGÃO e MELO (1982). Na segunda, estudos e análises dos solos colapsíveis foram realizados por Fucale (2000) no local onde foi implantado o Canal Pontal Azul (CPA) com cerca de 35 Km de extensão, que teve por objetivo avaliar a variação de volume do solo devido à inundação. Na terceira, Silva (2003) estudou o comportamento de um solo colapsível em uma área que recebeu a construção do Conjunto Habitacional Privê Village (CHPV), constituído por quatorze casas geminadas, todas de alto padrão, possuindo estacionamento, piscina e quadra coletiva. Inicialmente, oito dessas casas apresentavam fissuras bastante proeminentes levando os moradores à sensação de desconforto e segurança, como visto na Figura 16.

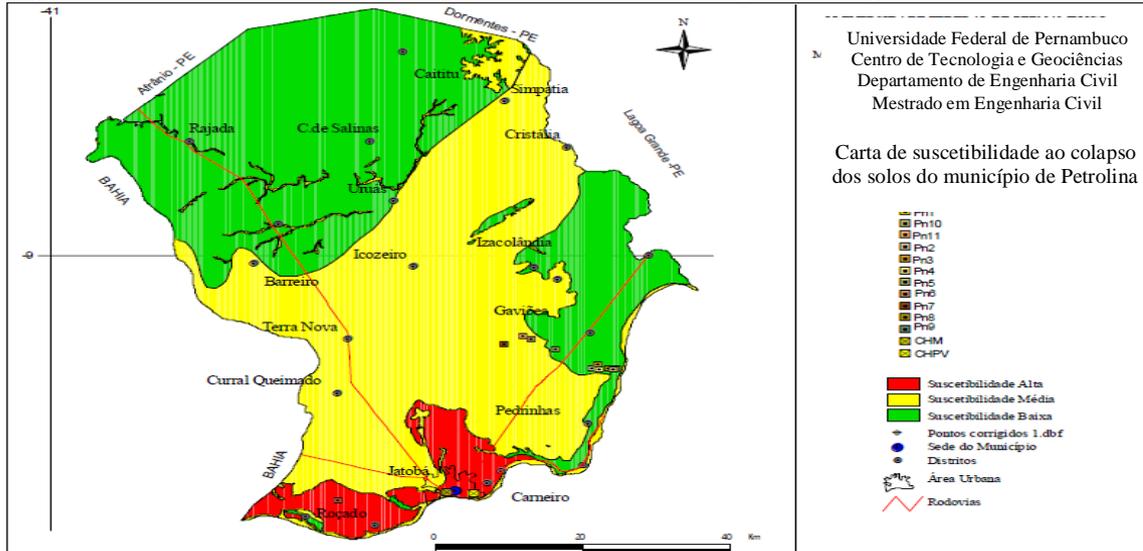
Figura 16 - Fissuras devido ao colapso - Privê Village/ Petrolina-PE.



Fonte: Torres (2014).

A fim de se obter informações sobre os locais de ocorrências desses solos, Silva (2003) usando a metodologia de Ferreira (2000) se utilizando da pedologia, desenvolveu uma carta de suscetibilidade ao colapso do município de Petrolina. Na Figura 17, percebe-se que cerca de 6% da área do município apresenta alta suscetibilidade da ocorrência de colapso e cerca de 44% apresenta suscetibilidade média.

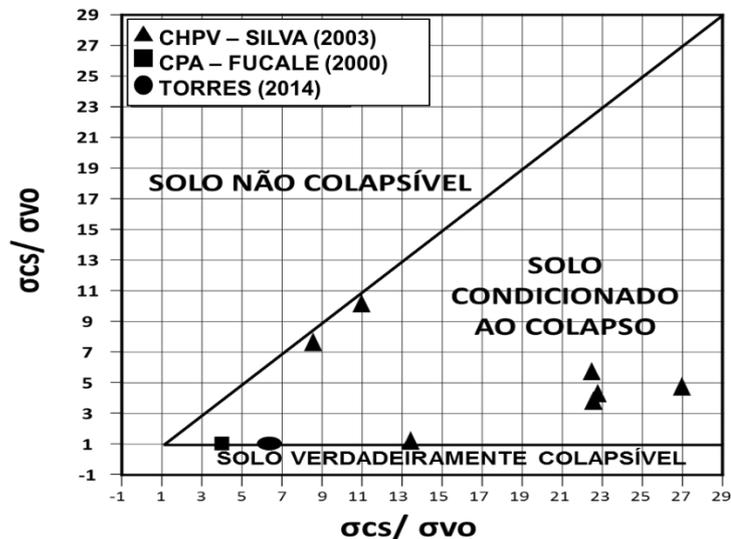
Figura 17 - Carta de suscetibilidade de ocorrência de solos colapsíveis e alguns locais de ocorrências.



Fonte: Silva (2003).

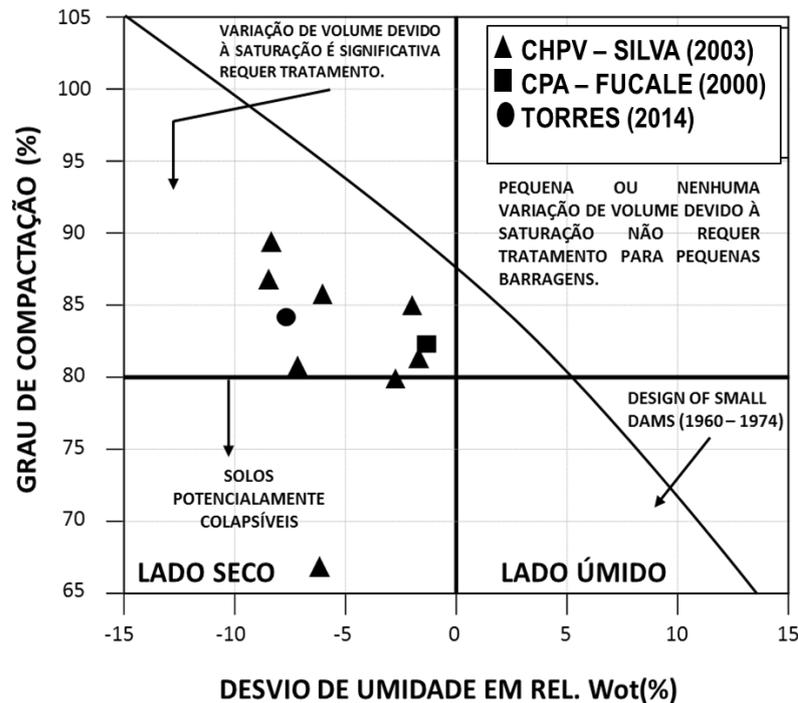
Considerando o critério desenvolvido por Reginatto e Ferrero (1973), o solo estudado é classificado como Verdadeiramente Colapsível, segundo Torres (2014) e de acordo com o critério do DESIGN OF SMALL (1960 – 1974), o solo estudado tem variação de volume significativa quando inundado requerendo tratamento, Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Critério de Reginatto e Ferrero (1970).



Fonte: Torres (2014).

Figura 19 - Critério de colapsibilidade de DESIGN OF SMALL (1960 – 1974).



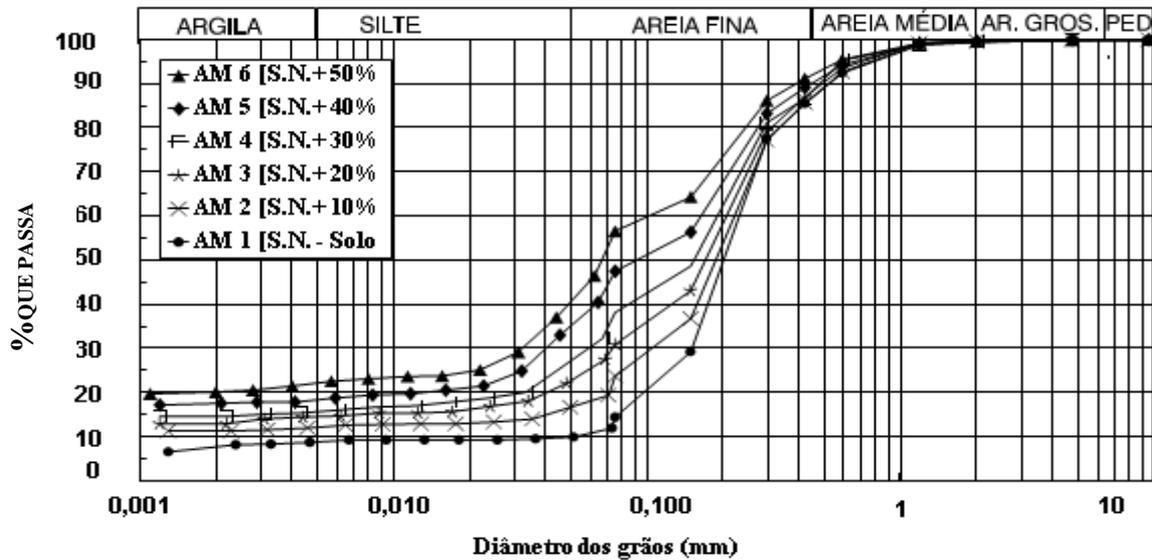
Fonte: Torres (2014).

2.5 Melhoramento de Solos Colapsíveis

Em ensaios edométricos simples realizados em solo colapsível de Petrolina/PE por Santana (1997) onde foi adicionado frações menor que 0,0074 mm do mesmo solo em diferentes percentuais ao solo, mostraram que com a adição, reduziu significativamente a colapsibilidade do solo. Onde para tensões inferiores a 80 kPa a inundação causou pequena expansão (< 1,0 %), indicando que há um teor de fração fina que adicionada ao solo não há colapso ou expansão quando inundado, deixando-o assim estabilizado.

Em outro estudo Ferreira (2010) avaliou o comportamento de um solo colapsível de Petrolândia/PE, adicionando ao solo, uma fração do mesmo solo menor do que 0,074 mm em diferentes proporções (10, 20, 30, 40 e 50%), avaliando o desempenho das misturas. A composição granulométrica do solo natural é constituída por 90% de areia, 2% de silte e 8% de argila. Das amostras estudadas, a2 e 6, correspondentes as adições da fração de 10 e 50% menor do que 0,074 mm, ocorrem um acréscimo das porcentagens de argila (4%) e de silte (2%) da amostra 2, para 22% (argila) e 18% (silte) na amostra 6 em relação à amostra natural e consequente diminuição de areia (Figura20).

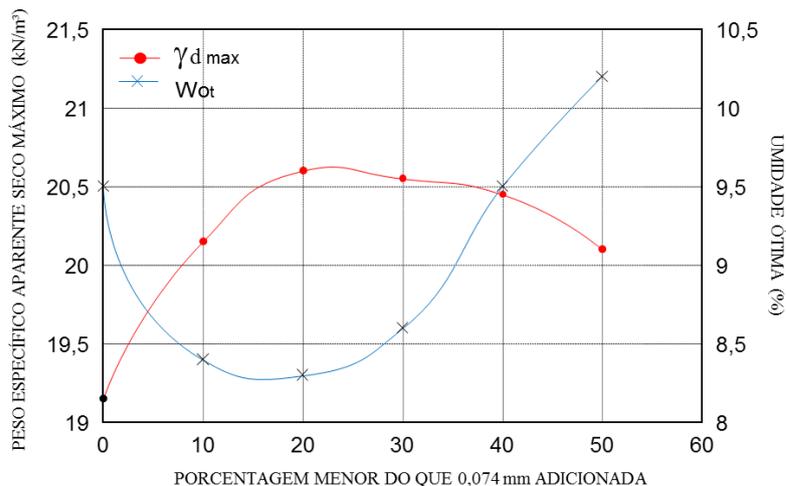
Figura 20 -Curvas granulométricas das amostras.



Fonte: Ferreira (2010).

O acréscimo da fração menor do que 0,074mm ao solo natural até 20%, causou um decréscimo na umidade ótima e um acréscimo no peso específico aparente seco. Para valores superiores a 20% o comportamento foi inverso. O acréscimo da fração ao solo menor que 0,0074 mm até 20%, conferiu um maior entrosamento entre os grãos e um menor teor de umidade ótima para uma mesma energia de compactação aplicada. A medida que a adição da fração fina é maior do que 50% prevalece o acréscimo de finos, reduzindo o peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima, Figura 21.

Figura 21 – Comportamento do acréscimo da fração menor do que 0,074 mm.



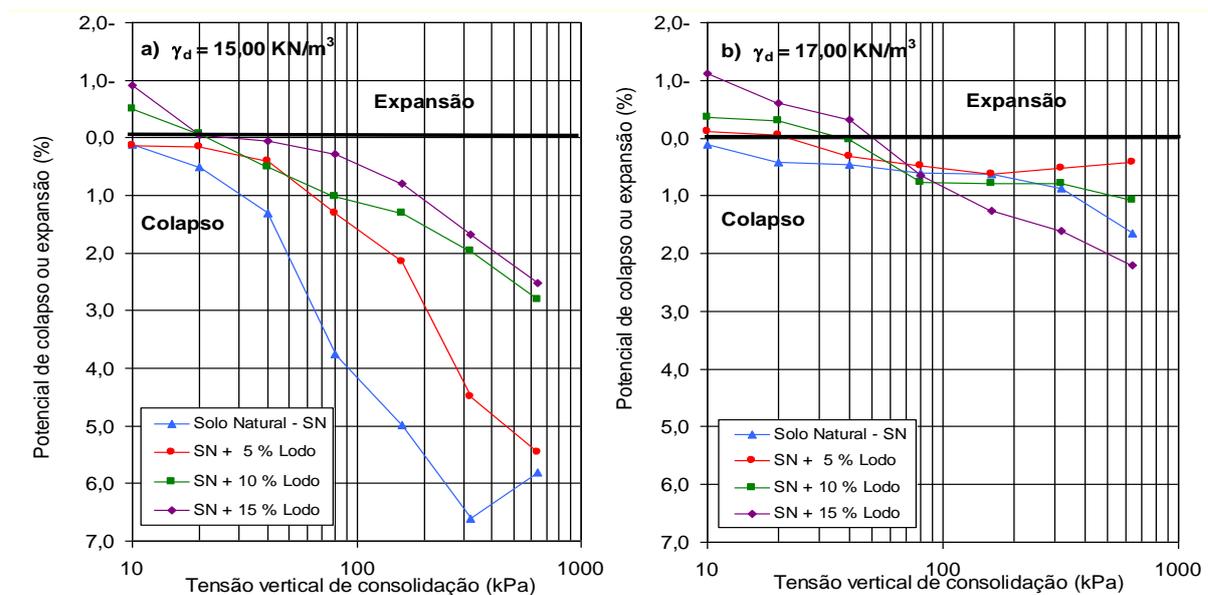
Fonte: Ferreira (2010).

Feitosa *et al.* (2010) analisou o uso de lodo de esgoto, previamente tratado, no melhoramento de um solo colapsível. Foi utilizado lodo, ambientalmente tratado, misturado ao solo, nas proporções em peso de 5, 10 e 15%, que foram compactadas, estaticamente, com umidade de,

aproximadamente, 3%, condições estas próximas as de campo, e pesos específicos aparente seco de $15,00 \text{ kN/m}^3$ e $17,00 \text{ kN/m}^3$.

Para a caracterização e análise da interação do solo com o lodo, foram realizados ensaios físicos, químicos, edométricos simples e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados mostraram que a medida que cresce a quantidade de lodo misturado ao solo, reduz os potenciais de colapso para todas as tensões aplicadas, com $\gamma_d = 15,00 \text{ kN/m}^3$, em relação ao solo natural compactado, e para tensões de inundação menores do que 20 kPa há pequena expansão ($<1,0 \%$). Para $\gamma_d = 17,00 \text{ kN/m}^3$, o acréscimo percentual de 5 % de lodo adicionado ao solo foi o que apresentou melhor redução no valor do potencial de colapso como ilustra a Figura 22 (FEITOSA *et al.* 2010).

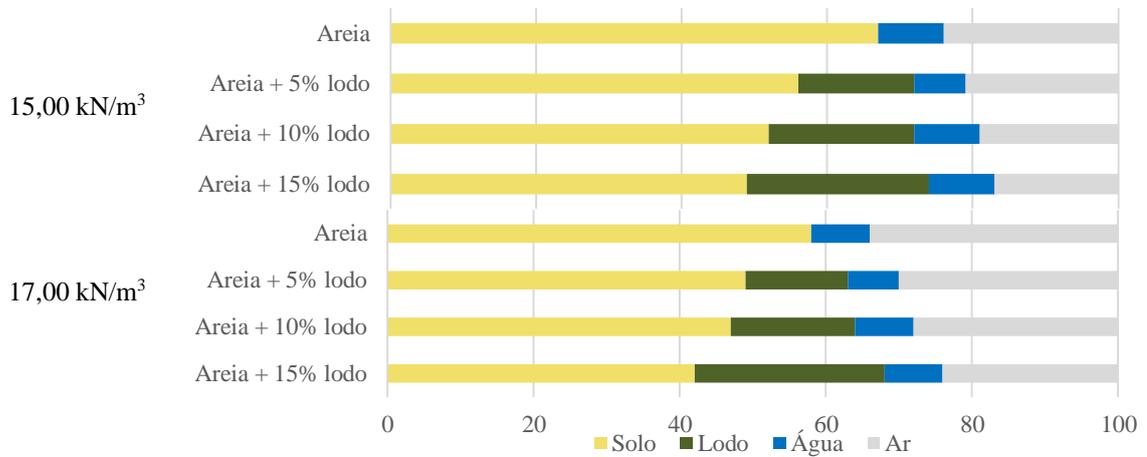
Figura 22 – Comportamento do acréscimo de lodo de esgoto a um solo colapsível em diferentes proporções.



Fonte: Feitosa *et al.* (2010).

Essa adição de lodo ao solo, proporcionou uma redução no índice de vazios para um mesmo peso específico aparente seco, o acréscimo de lodo aumentou o volume das partículas sólidas e reduziu o volume de vazios. Isto se deve ao fato de que as partículas do lodo têm um peso específico real dos grãos ($16,70 \text{ kN/m}^3$) menor que o do solo ($26,00 \text{ kN/m}^3$), como observado na Figura 23 (FEITOSA *et al.*, 2010).

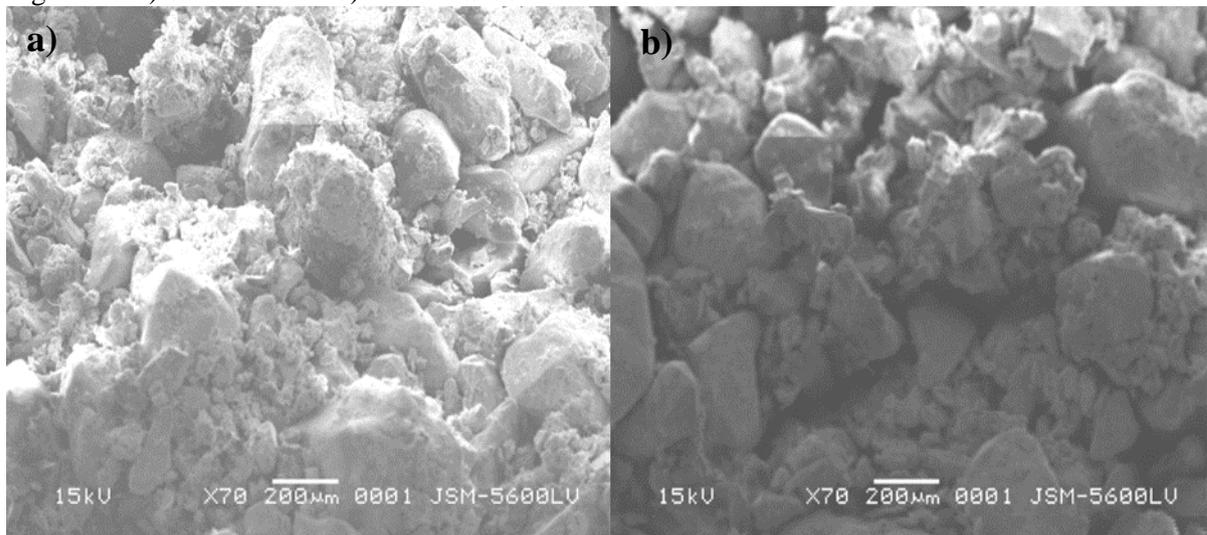
Figura 23 - Porcentagem de volume de cada componente da mistura (%).



Fonte: Feitosa *et al.* (2010).

O acréscimo de lodo também melhorou o empacotamento das partículas (Figura 24), reduzindo a colapsibilidade do solo para um mesmo peso específico aparente seco, mostrando ser um método promissor para o melhoramento de solos colapsíveis.

Figura 24–a) Solo Natura e b) Mistura Solo-Lodo.



Fonte: Feitosa *et al.* (2010).

CAPÍTULO 3

MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa de investigação experimental, que inclui as etapas de coleta de amostras de solo e RCC, da granulometria, definição dos percentuais de adição, preparação das misturas, metodologia e execução dos ensaios de laboratório para caracterização física e mecânica dos materiais estudados.

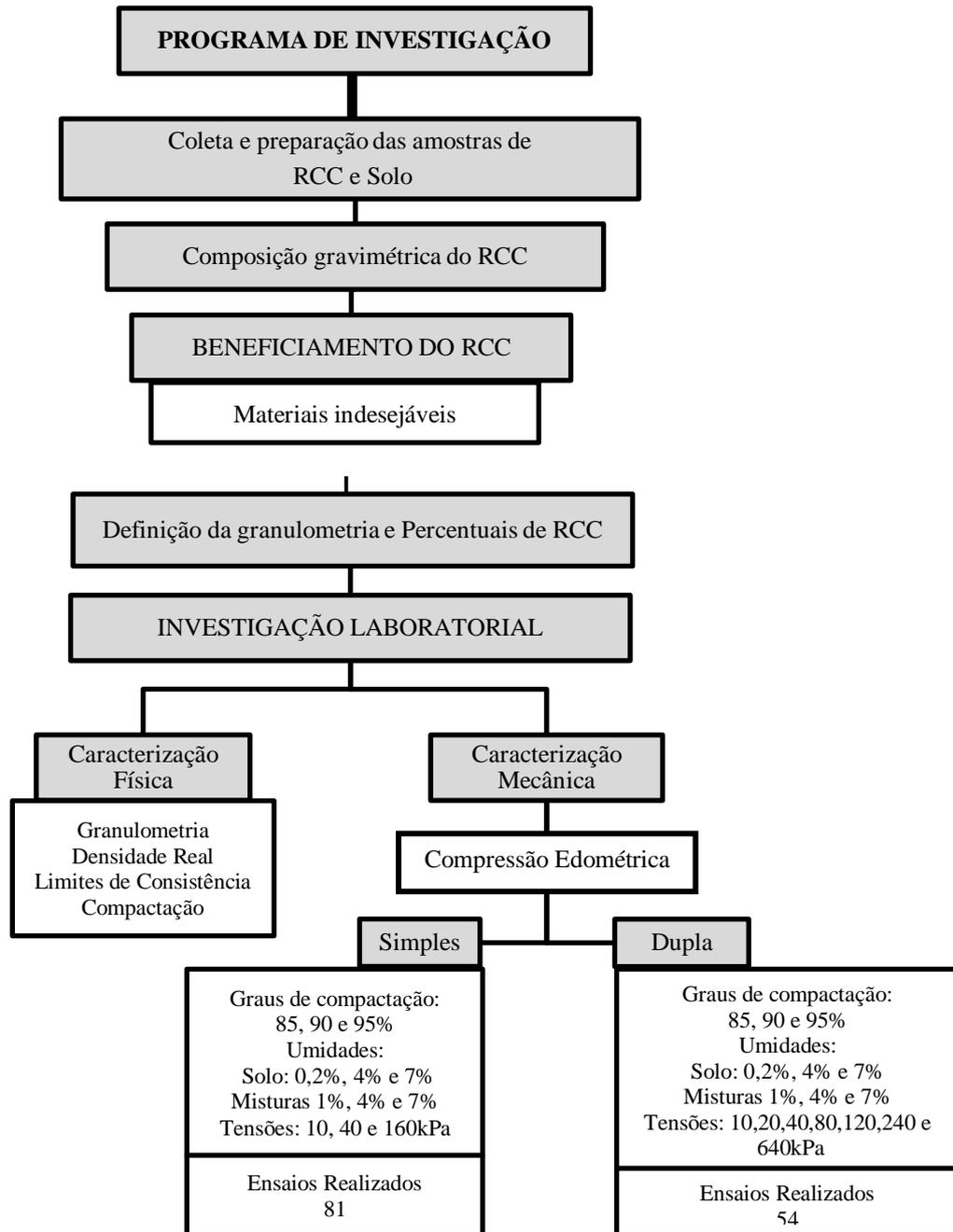
3.1 Programa de Investigação Experimental

Para efeito de comparação do desempenho do RCC aplicado em misturas solo/RCC face à estabilização do solo colapsível, se faz necessário, conhecer, notadamente, as propriedades físicas e mecânicas desses materiais. Tal comparação foi realizada submetendo-se as amostras de RCC e misturas solo/RCC a ensaios comumente empregados em solos naturais, e, portanto, seguindo os mesmos limites e classificações desses últimos. Pelo fato dos RCC empregados nesta pesquisa serem considerados inertes, não foram realizadas análises químicas.

A execução dos ensaios de laboratório seguiu as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foram analisadas as amostras individualmente, constituídas apenas por solo colapsível, resíduo beneficiado e as misturas entre ambos, com diferentes proporções, visando investigar as propriedades mecânicas e físicas do agregado miúdo reciclado de RCC, solo colapsível e as misturas.

Os ensaios realizados no solo colapsível, foram executados à parte, por Veríssimo (2015), onde foram adotados os mesmos procedimentos e condições para execução dos ensaios. Os resultados foram fornecidos para comparação com os desta pesquisa. Assim, foi seguido o programa experimental para as amostras do solo e misturas como ilustrado na Figura 25 a seguir.

Figura 25 – Fluxograma do programa experimental.



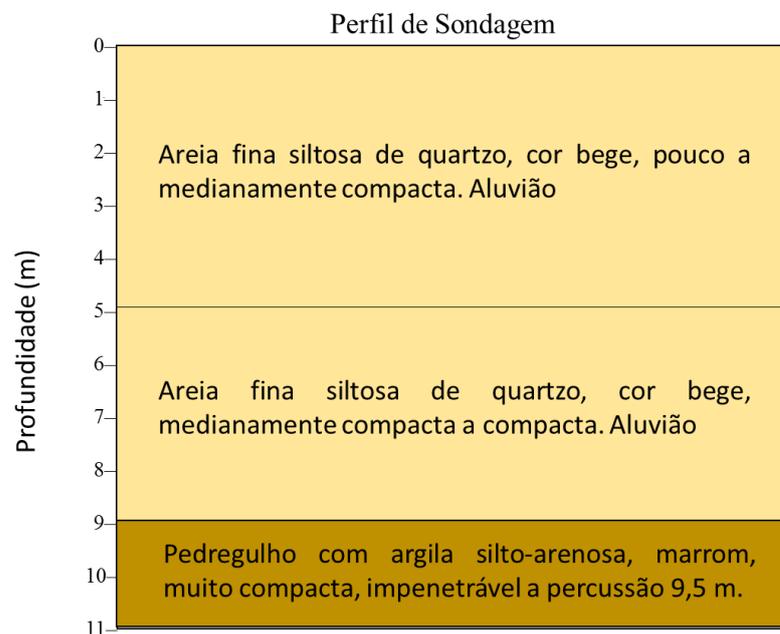
3.2 Coleta e Preparação das Amostras

3.2.1 Solo

O solo colapsível foi coletado e analisado em campo por Torres (2014) na cidade de Petrolina/PE, que é um dos principais centros socioeconômicos do sertão do Estado de Pernambuco.

O perfil típico do solo estudado de Petrolina, considerando 12 (doze) furos de sondagens, é constituído de 03 (três) camadas até 9,50 m de profundidade (TORRES, 2014). A primeira é uma areia fina siltosa pouco a medianamente compacta, a segunda é uma areia fina a média de medianamente compacta a compacta, e a terceira é uma camada de pedregulho com argila siltosa atingindo o impenetrável a 9,50 m (Figura 26).

Figura 26 - Perfil do solo colapsível.



Fonte: Torres (2014).

A Figura 27 mostra o local onde foram coletadas amostras indeformadas e almogadas representativas de solo Aluvionar, de aproximadamente 100Kg, na profundidade de 1,0 m, que foram armazenadas em sacos plásticos, etiquetadas e transportadas para o laboratório da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que posteriormente foi encaminhado para o Laboratório Avançado de Construção Civil – LACC da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI/UPE), Figura 28.

Figura 27–Local de coleta de amostras indeformadas de solo.



Fonte: Torres (2014).

Figura 28 – Amostras de solo pesadas e armazenadas em sacos plásticos.



3.2.2 Resíduos da Construção Civil

A coleta dos resíduos de Construção Civil (RCC) foi realizada em uma obra de edificação residencial de múltiplos pavimentos de um edifício residencial de grande porte, com 30 lajes, que se encontrava em fase de elevação de alvenaria, em Recife/PE (Figura 29). O processo construtivo utilizado para a realização do empreendimento é o tradicional na região, ou seja, estrutura de concreto armado e vedação vertical com tijolos cerâmicos. A obra possuía sistema de gerenciamento de RCC implantado no canteiro, em conformidade com a Resolução CONAMA N° 307/2002, logo, havia segregação dos resíduos por classes, além de possuir projeto de execução de alvenaria.

Figura 29 - Local da coleta de RCC.



A amostra total coletada correspondeu a 200kg e foi dividida em 05 (cinco) sacos plásticos para facilitar o transporte da obra até a Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco - POLI. A amostra foi armazenada no Laboratório Avançado de Construção Civil - LACC para a realização do ensaio de composição gravimétrica, do beneficiamento e, posteriormente, dos ensaios de caracterização física e mecânica no Laboratório de Mecânica do Solos - LMS.

O material coletado corresponde ao resíduo Classe A (Figura 30), ou seja, resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como solos provenientes de terraplenagem, componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas e placas de revestimentos), argamassa e concreto.

Figura 30 - Resíduo da construção civil coletado.



3.2.3 Composição Gravimétrica do RCC

A composição gravimétrica visa a identificação dos materiais constituintes de dada amostra, ao mesmo tempo em que informa a composição em peso de todos os seus constituintes em relação à massa total. Foi selecionada toda a amostra coletada, aproximadamente 200 kg de RCC seco, antes de serem colocados no britador de mandíbulas, com o intuito de classificar os diferentes materiais encontrados na sua composição.

Os materiais que passaram inicialmente na peneira N° 4 (4,75 mm) foram classificados como material miúdo, não sendo possível realizar uma separação tátil-visual. Também, foram classificados como misto o material composto por argamassa e tijolo cerâmico que não foi possível separar as partes. Em seguida, todas as amostras foram separadas, ensacadas e pesadas (Figuras 31 e 32).

Figura 31 – Separação dos materiais (a) e material miúdo passante na # 4,75mm (b).



Figura 32 – Amostras homogeneizadas (a) e Amostra ensacada (b).



3.2.3.1 Materiais Indesejáveis

Os materiais indesejáveis encontrados nos resíduos de construção civil são aqueles pertencentes às classes B, C e D da Resolução CONAMA nº 307 (CONAMA, 2002), tais materiais como madeira, metais, vidro, plástico, gesso, forro, tubulação, fiação elétrica, papel, dentre outros. Esses materiais contaminam e influenciam nos resultados dos ensaios. Durante a realização da composição gravimétrica, os materiais indesejáveis foram identificados, retirados e pesados (Figura 33).

Figura 33 – Amostras de materiais indesejáveis.



3.2.4 Beneficiamento do RCC

O beneficiamento do RCC coletado consistiu na britagem dos resíduos Classe A, em um britador de mandíbulas do fabricante Furlan, linha JC (Jaw Crushers) de propriedade da Universidade de Pernambuco - UPE (Figura 34). Nesse processamento, as amostras foram passadas várias vezes no britador de mandíbulas em sua abertura mínima, de forma a facilitar a redução das partículas ao tamanho limite dos agregados miúdos ($\varnothing_{\text{máx.}} < 4,75 \text{ mm}$).

Figura 34 - Britador de mandíbulas.



Na medida que o resíduo era cominuído, ele era passado por uma peneira N° 4 (4,75 mm), até se obter uma quantidade satisfatória para a pesquisa (Figura 35). O material graúdo retido na referida peneira após ser continuamente passado no britador, e não sofrendo mais redução de granulometria foi embalado e descartado, uma vez que não se enquadrava no limite de granulometria que constitui o foco de pesquisa do trabalho.

Figura 35– RCC beneficiado ($\varnothing_{\text{máx.}} < 4,75 \text{ mm}$).

3.2.5 Definição da granulometria e percentuais de RCC

Com o intuito de se conhecer a composição granulométrica da amostra de RCC, após o beneficiamento, foi realizado ensaio prévio de granulometria do resíduo passante na peneira N° 4, com malha de 4,75mm, denominado por RCC#4. O ensaio prévio de granulometria também foi adotado para o solo colapsível utilizado.

Estes ensaios, permitiram análise com base nos percentuais das correspondentes frações. Verificar que a faixa granulométrica entre as peneiras N° 4(4,75 mm) e N° 30(0,6 mm) obteve os maiores percentuais constituintes de partículas sólidas que poderiam vim a favorecer ao melhoramento do solo. A faixa granulométrica escolhida para a incorporação ao solo no estudo de melhoramento foi denominado RCC#30.

Após definição da faixa granulométrica do RCC, buscou-se, estabelecer as proporções a serem misturadas ao solo. Os percentuais de resíduos foram determinados de maneira exploratória com 03 (três) teores distintos de RCC#30: 10%, 30% e 50%.

O Quadro 4 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados nas amostras estudadas, com as correspondentes quantidades estudadas.

Quadro 4 - Quadro resumo dos ensaios realizados na investigação laboratorial.

Fase	Amostras	Granulometria	Densidade Real	LL	LP	Compactação	Edométrico Simples	Edométrico Duplo	Quantidade
Análise prévia	RCC#4	1	1	1	1	1	-	-	12
	Solo ⁽¹⁾	1	1	1	1	1	-	-	
Análise Final	Solo ⁽²⁾	-	-	-	-	-	27	18	196
	RCC#30	2	1	-	-	1	-	-	
	10% de RCC#30	2	1	-	-	1	27	18	
	30% de RCC#30	2	1	-	-	1	27	18	
	50% de RCC#30	2	1	-	-	1	27	18	
									$\Sigma = 208$

(1) Ensaios realizados por Torres (2014).

(2) Ensaios realizados por Verfssimo (2015).

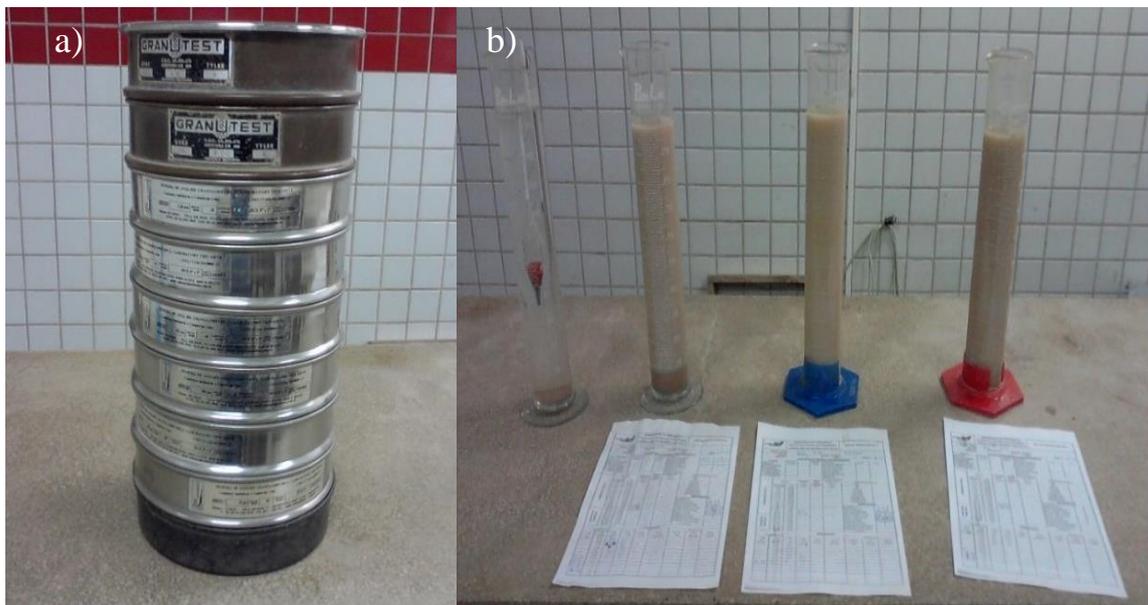
3.3 Caracterização física

3.3.1 Granulometria

A análise granulométrica de um material é fundamental para a realização de qualquer trabalho de engenharia. Isto porque o tamanho e a distribuição das partículas condicionam um grande número de propriedades geotécnicas, como por exemplo, permeabilidade, propriedades de compactação, arranjo das partículas, entre outras.

Para as amostras investigadas, foram realizadas as análises granulométricas por peneiramento e sedimentação com o uso do defloculante hexa-metafosfato de sódio (Figura 36). A preparação das amostras e execução dos ensaios de peneiramento e sedimentação obedeceram às normas NBR 6457/86 e NBR 7181/84

Figura 36 – Jogo de Peneiras (a) e Ensaio de sedimentação (b).



3.3.2 Densidade real

Na determinação da densidade real, empregou-se a norma NBR 6508/84, a partir do método do picnômetro e a bomba a vácuo, Figura 37. No ensaio, utilizou-se picnômetros de 50ml, amostra de solo, RCC e misturas RCC/solo.

Figura 37 - Ensaio da massa específica do agregado miúdo reciclado. a) Bomba a vácuo e Picnômetro; b) Retirada do ar do picnômetro.



3.3.3 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg fornecem indicativos dos solos quanto as suas características de plasticidade, permeabilidade e resistência. O limite de liquidez (LL) do solo natural foi determinado de acordo com a norma NBR 6459/84 e o limite de plasticidade (LP) com o procedimento descrito na NBR 7180/84. Foram executados os ensaios no solo, RCC e misturas.

3.3.4 Compactação

Tendo em vista que uma das soluções adotadas na prática da engenharia ao tratar solos colapsíveis é a destruição da estrutura original do solo por meio da compactação, ensaios de compactação foram realizados com o objetivo de caracterizar as amostras. Estes ensaios serviram, também, como referência na preparação de amostras compactadas para avaliar o efeito da compactação na redução da colapsibilidade do solo.

Os ensaios de compactação foram realizados utilizando a energia do Proctor Normal, segundo ABNT NBR 7182/86 e tem a finalidade de obter o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo para uma determinada energia de compactação. Os ensaios foram realizados nas amostras do solo, RCC e misturas RCC/Solo.

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram um soquete pequeno (com aproximadamente 2,5 kg) e um cilindro metálico pequeno (100 mm de diâmetro e 127 mm de altura), com disco

espaçador. A compactação foi realizada em 03 (três) camadas, sendo cada camada compactada com 26 golpes, posteriormente com pequenos acréscimos de umidade, variando de 1 a 3% em cada ponto considerando inicialmente as amostras secas ao ar. Neste ensaio foram utilizados 3kg de cada amostra, com reuso do material para a compactação em cada ponto no solo e misturas. Para a amostra de RCC, o ensaio foi realizado sem reuso do material. A Figura 38 ilustra, respectivamente, uma das amostras sendo acrescentada água e uma amostra compactada juntamente como cilindro e soquetes utilizados nos ensaios.

Figura 38 – Amostra umidificada (a) e Amostra compactada (b).



3.4 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica das misturas RCC/solo foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos da POLI/UPE e a do solo foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos da UNICAP, obedecendo as normas técnicas da ABNT NBR12007/90. Os ensaios executados nesta etapa do programa experimental foram os de compressão edométrica simples e duplos.

3.4.1 Ensaio de compressão edométrica

O comportamento do solo mediante os carregamentos depende da sua constituição e do estado em que o mesmo se encontra, e pode ser expresso por parâmetros que são obtidos em correlações ou por meio de ensaios, como o de compressão edométrica. Esse ensaio consiste na compressão de uma amostra contida dentro de um molde que impede qualquer deformação lateral.

A aplicação de carga vertical, a qual é constante em cada estágio do ensaio, é feita por meio da prensa de adensamento ou edométrica, que é composta por pesos previamente aferidos, que se apoiam em um braço de alavanca de relação 10:1, composta por uma célula onde se é colocada a amostra a ser ensaiada (Figura 39).

Figura 39 – Pressas edométricas (a) e Célula (b).



Na medição de variação de altura dos corpos de prova utilizou-se um extensômetro com sensibilidade de 0,01mm. Os ensaios de compressão edométrica foram executados segundo as recomendações da NBR 12007/90, com a finalidade de obter os índices de compressibilidade unidimensional do solo e das misturas de solo com resíduo, com e sem inundação do material.

3.4.1.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova das amostras de solo e misturas RCC/solo foram estudadas para 03 (três) valores de grau de compactação de 85%, 90% e 95% com diferentes valores dos teores de umidade. Umidade natural do solo 0,2% e misturas 1%; 4% e 7%. O processo de confecção dos corpos de prova para os ensaios consistiu, inicialmente, em uma moldagem da amostra em anel edométrico, por as amostras serem provenientes de um solo arenoso e o RCC ser granular não foi possível cravar o anel nas amostras. Para isso, fez necessário, a confecção de um molde de

aço (Figura 40) com a dimensão interna próxima ao diâmetro externo do anel, para que ele se encaixasse perfeitamente ao molde. Sua tampa, que comprime a amostra, respeitou a altura do anel (20 mm) para que ele não viesse a se chocar com o mesmo, ao invés da amostra, o que poderia interferir diretamente na compactação da amostra e posteriormente nos resultados.

Figura 40 - Molde de aço para compactação do solo.



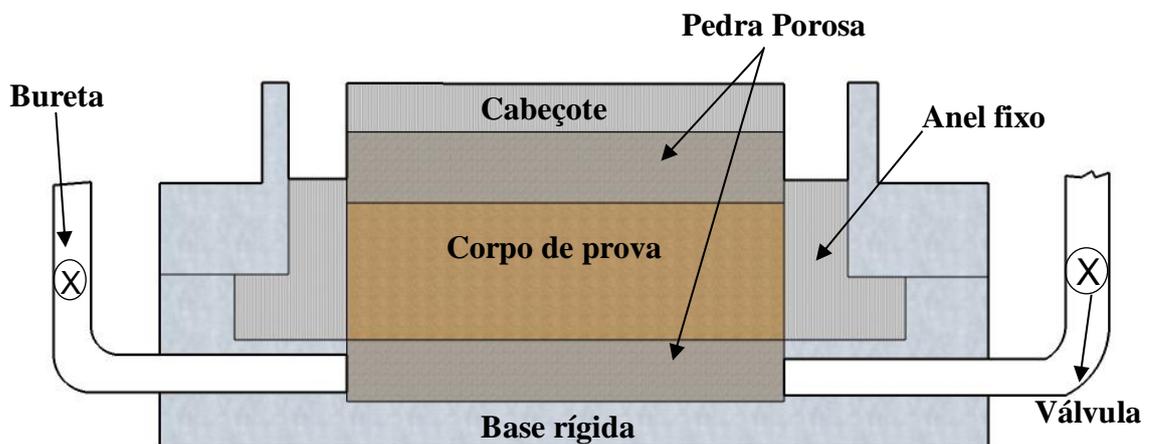
Inicialmente, calculava-se o peso da amostra necessária de solo para cada ensaio a ser realizado, respeitando sempre o grau de compactação e umidade da amostra. O processo de confecção dos CP's e o esquema de montagem das células edométricas convencionais estão apresentados na Figura 41 e Figura 42, respectivamente.

O anel de aço inoxidável era colocado sobre uma pedra porosa (base) seca ao ar, sobre a qual se colocava papel filtro (I). Em seguida, encaixava-se o molde (II). Após esse procedimento, a amostra era colocada dentro do molde onde já estava o anel (III), encaixando-se a tampa do moldador, sobreposto concentricamente ao anel (IV). Posteriormente, levava-se o conjunto para uma prensa hidráulica (V), onde se aplicava uma força estaticamente, para que o molde viesse a comprimir o corpo de prova até o limite do moldador (VI). Ao perceber que já estava em seu limite, a prensa era parada e desaplicada a força. Em seguida, desmontava-se o moldador e retirava-se o corpo de prova, fazia-se um acabamento na superfície do corpo de prova para regularização com a ajuda de uma espátula de aço (VII).

Figura 41 - Processo de confecção dos corpos de prova.



Figura 42 - Esquema de montagem das células edométricas convencionais.



A moldagem das amostras (controle de umidade, molde de compactação, o controle dos pesos dos corpos de prova e a técnica de compactação estática) resultou em corpos de prova, com reprodutividade das condições esperadas, apresentando índices físicos com pequena variação de valores, em relação aos desejados.

3.4.1.2 Procedimentos gerais Edométrico Simples e Duplos

Uma vez o corpo de prova acondicionado na célula e este na prensa, eram reguladas as provas e aplicava-se inicialmente uma tensão de 1,25 kPa, para que ocorresse o processo de assentamento do sistema e a leitura inicial para o processo de deformação.

As tensões aplicadas nos ensaios eram acrescidas de $\Delta\sigma/\sigma = 1$, iniciando com 10 kPa e finalizando com 160kPa nos ensaios simples e 640 kPa nos ensaios duplos. O tempo de duração de cada estágio de tensão era tal que a deformação entre dois intervalos de tempo consecutivos ($\Delta t/t = 1$) fosse inferior a 5 % da deformação total do solo ocorrida até o tempo anterior. Na fase de inundação, a entrada do permeante na célula era controlada por meio de uma piceta, sendo derramado de forma gradual.

O permeante utilizado nos ensaios foi a água destilada (AD). Os procedimentos adotados para a inundação das células foram:

- i** - ajustou-se o bico da piceta a entrada da mangueira de inundação da célula;
- ii**- procedia-se a inundação da célula com o permeante de forma gradual;
- iii** - ao observar que a quantidade de água percolada atingia metade da célula, o contrapeso do braço de relação 10:1 era colocado na metade do mesmo. Após o permeante percolar o solo e se mostrar no recipiente superior da célula, a mesma era completada com o permeante e o mesmo contrapeso era posicionado no fim do braço da prensa. Essa compensação se dá devido ao peso que a água exerce dentro da célula, que levaria a interferir no processo de deformação com leituras erradas;
- iv** - no momento em que o corpo de prova começava a se deformar, o cronômetro era acionado para que as leituras de deformações do corpo de prova com o tempo fossem realizadas, até a estabilização das deformações ou até 24 horas;

As tensões verticais de inundação foram de 10, 40 e 160 kPa para os edométricos simples. Os deslocamentos eram medidos nos tempos de 0;0,10; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240;

480 e 1440 minutos antes e após a tensão de inundação. No final do ensaio, pesava-se o corpo de prova e determinava-se o teor de umidade final do solo.

3.4.1.3 Ensaio edométrico duplo

Nos ensaios edométricos duplos, foram ensaiados dois corpos de prova: um, na umidade inicial, e outro, saturado. Inundou-se o primeiro corpo de prova depois de um período de 24h para dar início ao carregamento, com a finalidade de o solo estabilizar volumetricamente. Os corpos de prova foram compactados nos graus de compactações 85, 90 e 95% e umidades iniciais naturais de 0,2% para o solo, 1% para as misturas, e posteriormente com 4% e 7%. Os CP's foram montados na célula, posteriormente inundados previamente na tensão de 1,25 kPa. As tensões aplicadas nos ensaios foram acrescidas da mesma maneira que as tensões nos ensaios edométricos simples ($\Delta\sigma/\sigma = 1$), sendo as tensões de valor inicial de 10 kPa; 20 kPa; 40kPa; 80kPa;160kPa; 320kPa e final de 640kPa. Cada estágio durou o tempo de 1 hora para o carregamento até a tensão final desejada (640kPa), sendo acompanhado até a leitura de 24h na tensão final. Posteriormente a última leitura, era realizado o descarregamento. No descarregamento, as tensões por estágio foram 160kPa, 40kPa e 10 kPa, com 1 hora de leituras para cada tensão.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

São apresentados neste capítulo os resultados, as interpretações e as correspondentes análises e comparações dos parâmetros obtidos no programa experimental realizado, assim como o comportamento mecânico do solo colapsível e das misturas solo/RCC para utilização em estabilização de solos colapsíveis.

4.1 Caracterização Física

4.1.1 Composição Gravimétrica

Na análise da amostra bruta coletada de RCC na fase de alvenaria, observou-se que o material cinza é o principal constituinte 35,66%. Em seguida, vem o material proveniente de tijolo (31,16%), miúdo (20,14%), misto (12,72%) e outros (Tabela 5), apresentando uma heterogeneidade em seus constituintes.

Tabela 5 - Porcentagem de materiais.

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA		
Material	Peso (Kg)	%
Madeira	0,03	0,01
Metal	0,01	0,01
Plástico	0,07	0,04
Gesso	0,12	0,06
Papel	0,08	0,04
Tijolo	62,18	31,16
Misto	25,38	12,72
Cinza	71,16	35,66
Miúdo ($\phi \leq 4,75\text{mm}$)	40,20	20,14
Peso total da amostra	200	100

A amostra de RCC estudada é classificada como mista, uma vez que a quantidade de materiais cimentícios apresentada é inferior a 90%, de acordo com NBR15.116 (ABNT 2004). Esta variabilidade na composição dos resíduos, também foi observada por outros autores, como mostra a Tabela 6 com seus três principais constituintes. A ausência do material concreto se explica pela fase da coleta das amostras ser a de levantamento de alvenaria, posterior a de estrutura onde se consome grande quantidade de concreto. Verificou-se também que o resíduo

da construção civil estudados pelos autores apresentaram predominantemente resíduo classe A como constituintes.

Tabela 6 - Principais constituintes do RCC em pesquisas.

Autor	Constituinte					
	Cerâmico (%)	Concreto (%)	Argamassa (%)	Rochas (%)	Telhas (%)	Misto (%)
Zordam (2007)	21	21	36	-	-	-
Leite (2011)	28	-	28	31	-	-
Vieira & Molin (2004)	48	19	28	-	-	-
Carneiro (2005)	19	14	24	-	-	-
Moraes (2006)	25	38	22	-	-	-
Tavares & Dias (2008)	55	5	23	-	-	-
Bernardes <i>et al.</i> (2008)	29	14	27	-	-	-
Ji Chemet <i>al.</i> (2003)	19	72	-	-	9	-
Rodrigues (2011)	4	69	-	-	-	23
Esta pesquisa	31	-	36	-	-	13

A percentagem do material denominado como outros (papel, plástico, madeira e metal), tem apenas 0,19%. Estes tipos de resíduos foram desprezados, atendendo ao requisito estabelecido pela norma NBR 15115 (ABNT, 2004) que estabelece que devem ser evitadas as presenças de madeiras, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes.

Este percentual baixo também está ligado a segregação do resíduo, o que mostra que o material coletado teve uma boa segregação devido a implantação do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil –PGRCC na obra. Percentuais baixos também foram encontrados em outras pesquisas realizadas com RCC misto, Tabela 7.

Tabela 7 - Percentuais de materiais indesejáveis em outras pesquisas com RCC Misto.

Autor	Mat. Indesejáveis (%)
Vieira & Molin (2004)	2
Carneiro (2005)	7
Moraes (2006)	2
Zordam (2007)	1
Bernardes <i>et al.</i> (2008)	0,6
Rodrigues (2011)	0,05
Esta Pesquisa (2015)	0,19

4.1.2 Granulometria

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, foram elaboradas as curvas granulométricas de todas as amostras investigadas (Figura 43). Um resumo dos percentuais das frações por constituintes de cada amostra está mostrado na Tabela 8 enquanto que os correspondentes coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc), são apresentados na Tabela 9.

Figura 43 -Curvas granulométricas das amostras estudadas.

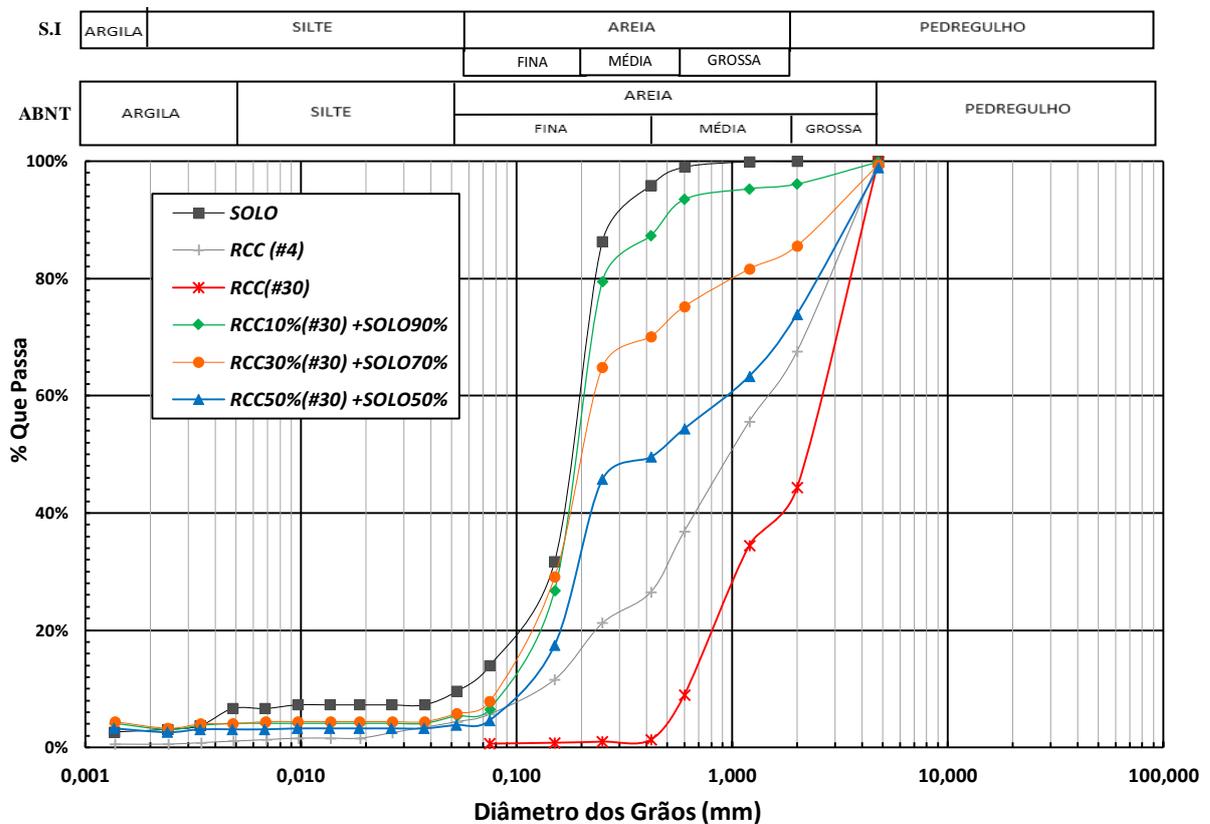


Tabela 8 - Percentual das frações por constituintes (ABNT).

Fração Granulométrica	Amostras					
	SOLO (%)	RCC(#4) (%)	RCC(#30) (%)	RCC#30 10% + Solo 90% (%)	RCC#30 30% + Solo 70% (%)	RCC#30 50% + Solo 50% (%)
Pedregulho	0	0	0	0	0	0
Areia Grossa	1	32	56	4	14	26
Areia Média	40	42	43	9	16	25
Areia Fina	49	20	1	81	64	45
Silte	3	5	0	2	2	1
Argila	7	1	0	4	4	3

Tabela 9 – Coeficiente de uniformidade e curvatura das amostras deste estudo.

Amostras	Cc	Cu	DISTRIBUIÇÃO	SUCS	TRB
RCC #4	1,23	11,54	Bem graduada	SW	A-1-b
RCC #30	0,74	4,19	Mal Graduada	SP	A-1-a
SOLO	2,41	3,39	Mal Graduada	SP-SM	A-2-5
RCC#30 10% + Solo 90%	1,44	2,33	Mal Graduada	SP	A-3
RCC#30 30% + Solo 70%	1,27	2,86	Mal Graduada	SP	A-3
RCC#30 50% + Solo 50%	0,33	8,91	Bem Graduada	SW	A-1-b

O solo é essencialmente arenoso, como mostra sua distribuição granulométrica com 90% de areia, 7% de argila e 3% de silte. O solo é mau graduado ($Cu < 5$ e $Cc 2,41$), não líquido e não plástico, se enquadrando no grupo SP-SM (areia fina siltosa mal graduada) na classificação do SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) ou USCS (Unified Soil Classification System) e A-2-5 na classificação TRB (Transportation Research Board).

No que se refere aos resíduos, na amostra prévia de RCC#4, verifica-se a presença de 94% de areia, 5% de silte e 1% de argila, sendo bem graduada ($Cu > 5$). Enquanto que na amostra de RCC#30 é constituída por 100% pela fração de areia, sendo mal graduada ($Cu < 5$). A ausência de silte e argila nesta última amostra deve-se ao processo de peneiramento realizado. Os resíduos se enquadram na classificação SUCS e TRB, respectivamente, como SW (areia bem graduada) e A-1-b para o RCC#4, e SP (areia mal graduada) e A-1-a para o RCC#30.

Nas curvas granulométricas das misturas solo-RCC#30, onde acrescentou-se diferentes percentuais da amostra de RCC#30 ao solo, foi observado o aumento das frações de areia média e areia grossa, enquanto que os valores da fração de areia fina apresentaram redução. A fração predominante nas misturas é a areia, com valores entre 94% a 96%. As frações de silte e argila das misturas foram reduzidas se comparadas ao solo, sendo diminuídas em até 4% na mistura de 50% de RCC#30 + 50% de Solo. As curvas das amostras indicaram comportamento uniforme, com exceção da amostra de RCC#30, que se apresentou descontínua, conforme seu Cc.

A amostrada mistura RCC#30 50% + Solo 50% apresentou distribuição das partículas bem graduada (Cu de 8,91), as demais mal graduadas. As misturas foram classificadas como SP (areia mal graduada) e A-3 para as misturas solo-RCC#30 com 10% e 30% de RCC#30. Para a mistura RCC#30 50% + 50% de solo a classificação foi SW (areia bem graduada) e A-1-b (Tabela 9). A adição de RCC#30 ao solo de Petrolina melhorou suas características para uso em subleito de pavimentos. O solo colapsível passa de A-2-5 para A-1-b.

4.1.3 Densidade real

A Tabela 10 apresenta os valores encontrados para densidade real das amostras utilizadas na pesquisa.

Tabela 10 – Valores de densidade real dos materiais desta pesquisa.

Amostras	Densidade Real
Solo	2,638
RCC_{#30}	2,604
RCC_{#30} 10% + Solo 90%	2,632
RCC_{#30} 30% + Solo 70%	2,627
RCC_{#30} 50% + Solo 50%	2,622

Observa-se que a densidade do solo é maior em relação as outras amostras, e a menor para o RCC_{#30}, isto decorre de uma maior porosidade dos resíduos por terem argamassa aderida a seus grãos ou pelas partículas mais porosas dos resíduos de tijolos. Os valores da densidade real dos grãos com o acréscimo das frações de RCC_{#30} ao solo acarreta num decréscimo de densidade nas misturas que se apresentam com valores entre os dois materiais, o que indica que ao se adicionar o RCC_{#30} ao solo, poderá ser obtido um material um pouco mais leve que o solo puro.

Nunes (2007) afirma que a origem do material reciclado utilizado interfere no valor da densidade real, atribuindo os valores obtidos ao teor de ar aprisionado em agregados porosos e da redução da massa específica referente ao acréscimo da parcela de RCC.

4.1.4 Limites de consistência

Os ensaios do solo, RCC_{#30} e das misturas apresentaram comportamento de solo granular, por isso, nenhuma das amostras apresentaram limites de liquidez e plasticidade, comportando-se como material não líquido e não plástico.

4.1.5 Compactação

As curvas de compactação das amostras de solo, RCC_{#30} e das misturas estão apresentadas na Figura 44, enquanto que os correspondentes valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo estão compilados na Tabela 11.

Figura 44 - Curvas de compactação das amostras estudadas.

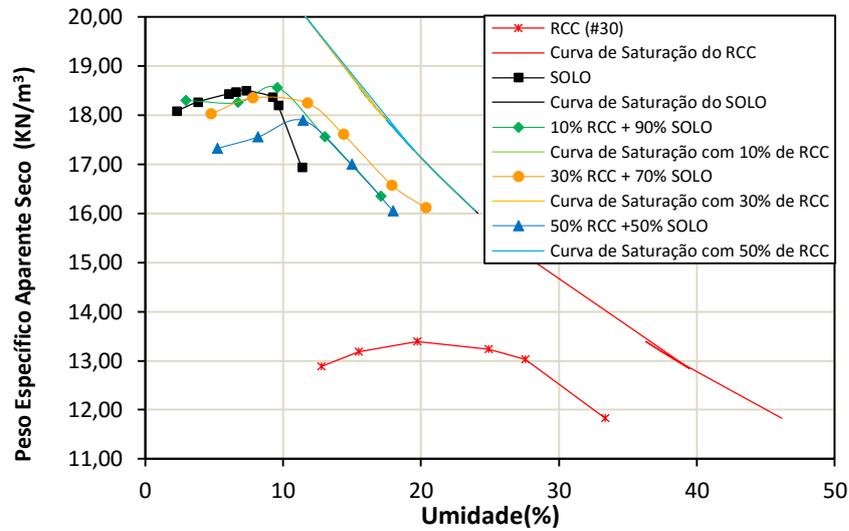


Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compactação.

Amostras	W _{ot} (%)	γ _d máx (kN/m³)
Solo	7,30	18,50
RCC_{#30}	19,72	13,39
RCC_{#30} 10% + Solo 90%	9,57	18,47
RCC_{#30} 30% + Solo 70%	9,97	18,37
RCC_{#30} 50% + Solo 50%	11,44	17,89

O solo apresenta um maior valor de peso específico aparente seco máximo (18,50 kN/m³) comparado ao RCC_{#30}(13,39 kN/m³), possivelmente em função de ter uma curva granulométrica mais uniforme, enquanto que o resíduo uma curva descontínua, ou seja, ausência de partículas sólidas de determinados diâmetros, prejudicando assim um melhor arranjo das mesmas. A umidade ótima da amostra de resíduo (19,72%) mais alta comparada ao solo (7,30%), pode ser explicado, pelo fato de haver uma presença considerável de material cerâmico em sua composição (47%), que provocou uma absorção de água mais alta durante a realização do ensaio, por se tratar de um material mais poroso.

Sobre as misturas solo-RCC_{#30}, verifica-se que com o acréscimo do RCC_{#30} há uma redução dos valores de peso específico aparente seco máximo de até 3,3% das misturas em relação ao solo, diferenciando-se no que se refere à umidade ótima. Onde ocorre um aumento significativo da mesma à medida que se aumenta o teor de RCC_{#30}, com acréscimos de 31,1%, 36,6% e 56,7%, em relação as misturas com 10%, 30% e 50% RCC_{#30}, respectivamente. Situando-se

entre os valores correspondentes às amostras de solo e RCC_{#30} como observado na Tabela 11. O acréscimo de RCC_{#30} ao solo de Petrolina elevou os valores da umidade ótima e reduziu os valores do peso específico aparente seco máximo das misturas.

Resultado semelhante ao de Feitosa *et al.* (2010) que com o acréscimo de resíduo ao solo aumentou a umidade ótima (w_{ot}) até o acréscimo de 10% e um pequeno decréscimo para 15%. O peso específico aparente seco máximo, praticamente, não altera, até o acréscimo de 10% e decresce para 15 % de adição de lodo. Ferreira e Tomé (2011) conseguiram resultados inversos, com o acréscimo de RCC a um solo, onde houve um aumento do peso específico aparente seco máximo com o aumento do teor de resíduo na mistura e que com o aumento do teor de resíduo na mistura, a umidade ótima tendeu a diminuir.

É importante observar que, quando se toma como referencial as curvas de compactação do solo e RCC_{#30}, as umidades ótimas das misturas estão localizadas no ramo úmido da curva, diferenciando-se do solo (Figura 44). Esse comportamento sugere que para manter a mesma capacidade de suporte com a mesma energia de compactação, adicionando-se o RCC_{#30} ao solo, um aumento da umidade ótima é verificado para compensar a redução do peso específico aparente seco máximo.

Ainda com relação ao peso específico e umidade ótima, outras pesquisas utilizando o RCC com materiais do tipo misto ou de apenas um tipo de material (cerâmico ou cimentício), obtiveram os seguintes valores (Tabela 12).

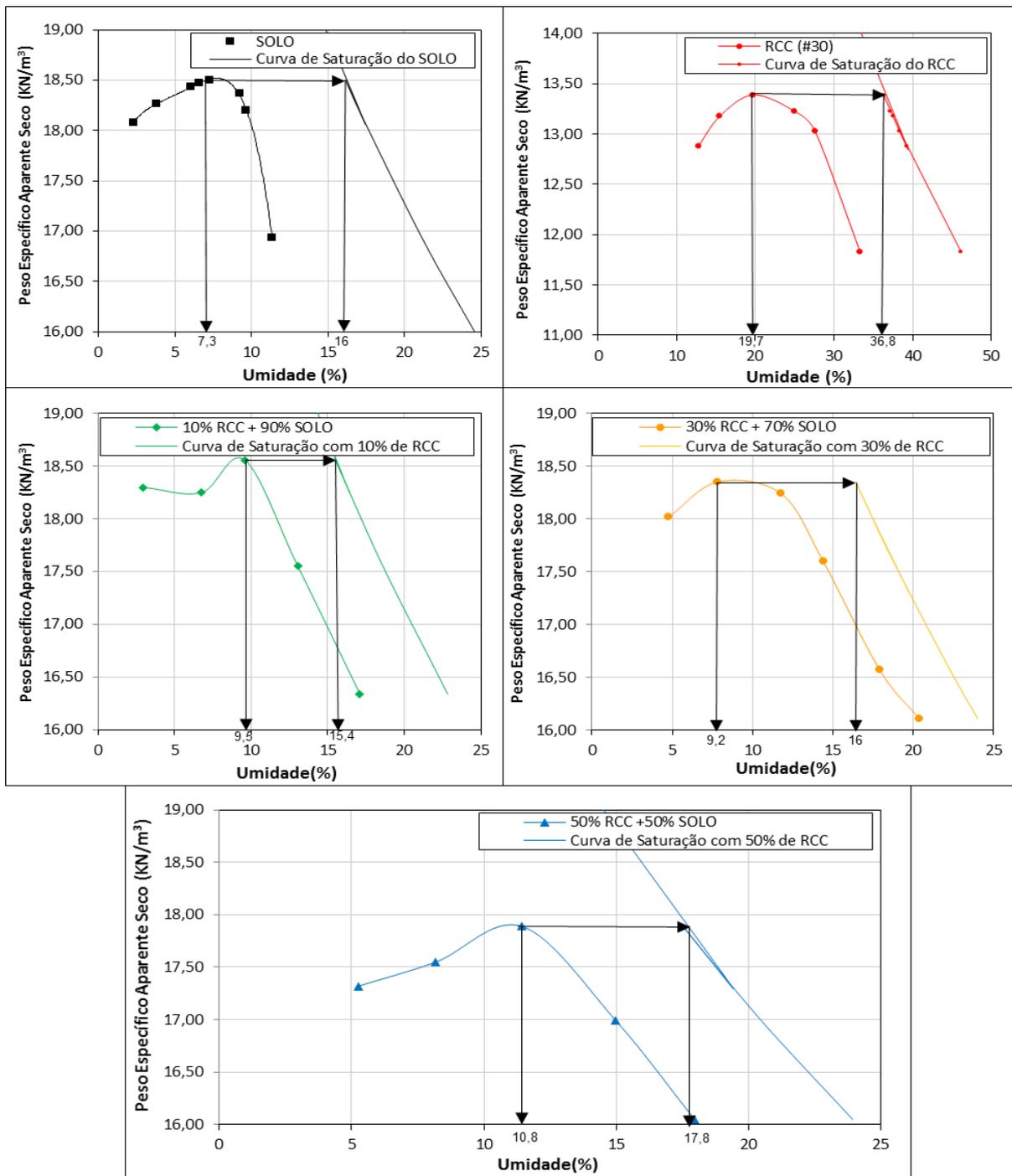
Tabela 12 - Valores de Peso específico e Umidade ótima de outras pesquisas.

Tipo de Resíduo	$W_{ot}(\%)$	$\rho d_{m\acute{a}x}(kN/m^3)$	Autor
Misto	13,0 a 17,8	17,9 a 18,9	Santos (2007)
Misto	14,0 a 21,0	15,7 a 17,5	Macedo (2008)
Cinza	11,0 a 21,2	17,8 a 20,3	Grubba (2009)
Misto	17,5	15,8	Lira Jr. (2010)
Misto	24,4 a 26,4	14,64 a 15,06	Ferreira e Tomé (2011)
Misto	18,4 a 19,9	17,1 a 17,9	Proença (2012)
Misto	15, 5 a 22	16,4 a 19,4	Macedo (2013)
Misto	19,72	13,39	Esta Pesquisa (2015)

4.1.5.1 Formas das curvas de compactação

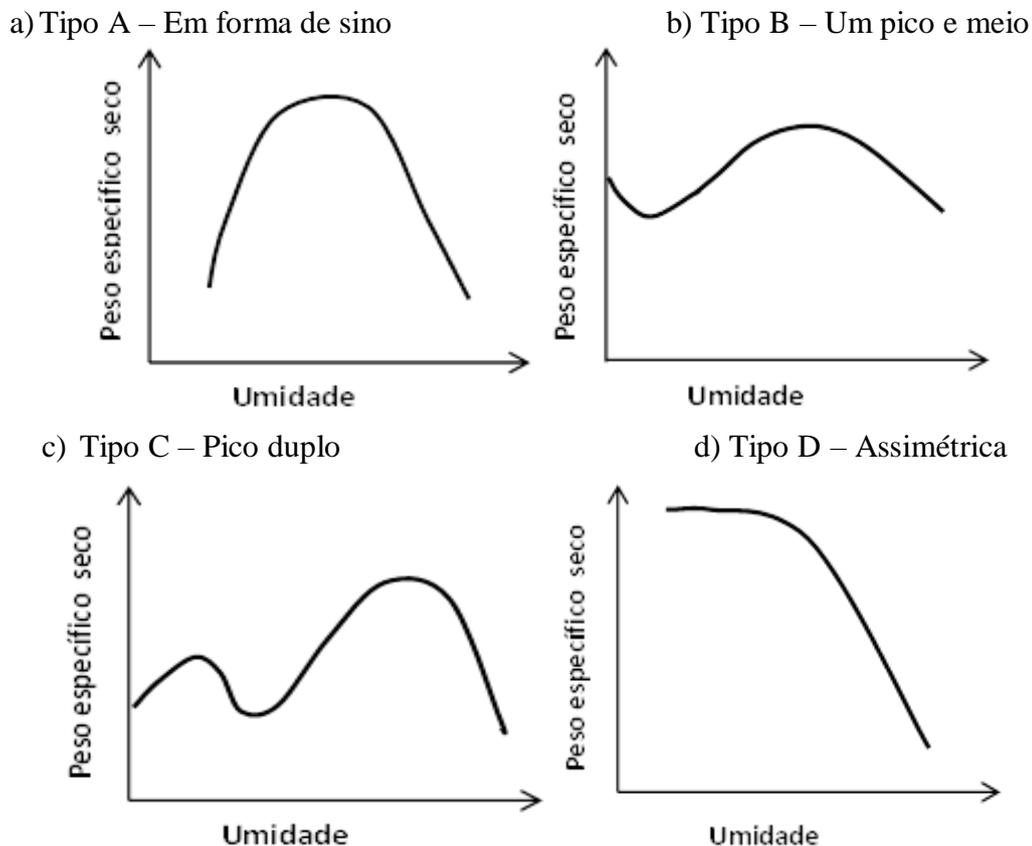
A forma das curvas de compactação do solo, RCC_{#30} e misturas solo/RCC_{#30}, Figura 45, foram classificadas segundo critérios de Lee e Suedkamp (1972) e Maccarinie Santos (1991) *apud* Ferreira (2012).

Figura 45 - Curvas de compactação do solo, RCC_{#30}e misturas.



Lee e Suedkamp (1972) criaram quatro grupos de tipos de curvas ao analisarem curvas de compactação de 35 amostras de solos. Os autores encontraram a curva de compactação tipo A, um único pico, em solos argilosos com Limites de Liquidez entre 30% e 70%. As curvas do tipo B e C ocorreram em solos com Limites de Liquidez menores do que 30%. As curvas de compactação do tipo B são curvas de um pico e meio e as do tipo C são curvas de pico duplo. As curvas do tipo D não possuem um pico definido e são chamadas de assimétricas. Ainda segundo Lee e Suedkamp, as curvas do tipo C e D ocorreram em solos com valores de Limites de Liquidez maiores do que 70%, Figura 46.

Figura 46. Formas de curvas de compactação encontradas em diferentes tipos de solos.



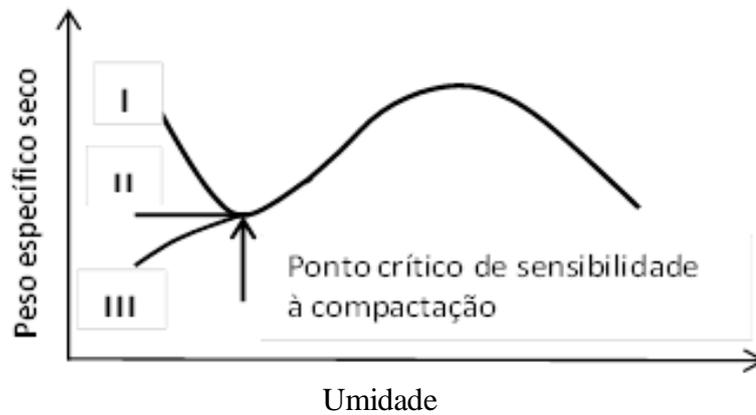
Fonte: Lee e Suedkamp (1972).

Tomando-se por base a classificação de Lee e Suedkamp (1972), Figura 46, e analisando-se as curvas de compactação da presente pesquisa, apresentadas na Figura 45, verifica-se que a forma da curva de compactação do Solo e do RCC_{#30} é do tipo A, em forma de sino; da mistura com 10% de RCC_{#30} é do tipo B com um pico e meio; a mistura com 30% de RCC_{#30} é do tipo A; a mistura com 50% de RCC_{#30} é do tipo B,

Um outro critério também analisado nesta pesquisa foi o de Maccarini *et al.* (1988), que indicam três tipos de curvas de compactação para o comportamento dos solos, onde apresentam uma

primeira aproximação para umidades à esquerda do ramo ascendente ao ótimo, utilizando o conceito de ponto crítico de sensibilidade à compactação anteriormente estudado por Faure (1980), Figura 47. Nas curvas do tipo I ocorre uma diminuição do peso específico seco com o aumento da umidade até o ponto crítico. Nas curvas do tipo III ocorre o inverso e nas curvas do tipo II ocorre que os pesos específicos aparentes secos são relativamente constantes, até o ponto crítico.

Figura 47 - Modelo de comportamento da curva de compactação para umidade à esquerda do ramo ascendente.



Fonte: Maccarini *et al.* (1988).

Assim, com base na classificação de Maccarini *et al.* (1988), as formas das curvas de compactação do Solo, o RCC_{#30} e das misturas com 30% de RCC_{#30} e 50% de RCC_{#30}, onde ocorre um aumento do peso específico aparente seco máximo com o acréscimo da umidade até o ponto crítico, é do tipo III, enquanto que da mistura com 10% de RCC_{#30}, onde ocorre uma diminuição do peso específico seco com o aumento da umidade até o ponto crítico, é do tipo I. A Tabela 13 apresenta um resumo das classificações das amostras estudadas conforme critérios utilizados.

Tabela 13 - Resumo classificação das curvas de compactação.

Amostras	Critérios	
	Lee e Suedkamp	Maccarini <i>et al.</i>
	(1972)	(1988)
Solo	A	III
RCC _{#30}	A	III
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	B	I
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	A	III
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	B	III

Isto indica que o acréscimo do RCC_{#30} ao solo modificou as formas das curvas em duas amostras, em relação ao solo. Comportamento similar foi observado em solos arenosos também por Lee e Suedkamp (1972) e Ferreira (2012), onde o aumento de umidade até o ponto crítico de sensibilidade de compactação também causou uma diminuição do peso específico aparente seco.

Ferreira (2012) relata que a pequena quantidade de água absorvida pelas partículas começa a formar meniscos que tendem a manter as partículas juntas, aumentando a resistência e diminuindo o peso específico aparente seco máximo do solo. Quanto mais água é adicionada há redução de sucção e o efeito do anti-lubrificante atua em direções opostas. Se mais água é adicionada, o efeito lubrificante acentua e as partículas deslizam umas sobre as outras, crescendo o peso específico aparente seco com a compactação. Isto ocorre até atingir-se o peso específico seco máximo correspondente à umidade ótima. A partir desta condição, ao se adicionar água no solo está absorve parte da energia de compactação, gerando tensão neutra positiva, reduzindo o peso específico aparente seco do solo.

Nas curvas de compactação, também está apresentada uma forma de determinação gráfica da umidade em que cada solo compactado atinge a saturação, tomando-se como referência o peso específico aparente seco máximo e a curva de saturação de 100% (Figura 49). O maior valor das diferenças entre a umidade ótima e a umidade de saturação encontrado foi o do RCC_{#30} 17,15%. Já do solo, das misturas com 10% de RCC_{#30}, 30% de RCC_{#30} e 50% de RCC_{#30}são, respectivamente, 8,7; 5,9; 6,1 e 6,4%. É importante ressaltar que com o aumento da proporção de RCC_{#30} acrescentado ao solo, provoca um aumento gradual nesta diferença de umidade. Comportamento similar foi encontrado por Feitosa *et al.* (2010) e Feitosa (2009).

4.1.5.2 Influência da compactação na granulometria

O processo de compactação pode causar a quebra das partículas e, assim, mudanças nas características das partículas do material estudado, como é o caso da granulometria. Macedo (2013) verificou que a distribuição e o tamanho dos grãos são alterados com o processo de compactação.

Na Figura 48 são apresentadas as curvas granulométricas das amostras de solo, do resíduo e das misturas, antes e depois do ensaio de compactação, para fins de análise da influência da compactação na granulometria.

Figura 48 - Curvas granulométricas das amostras antes e depois da compactação (D.C.).

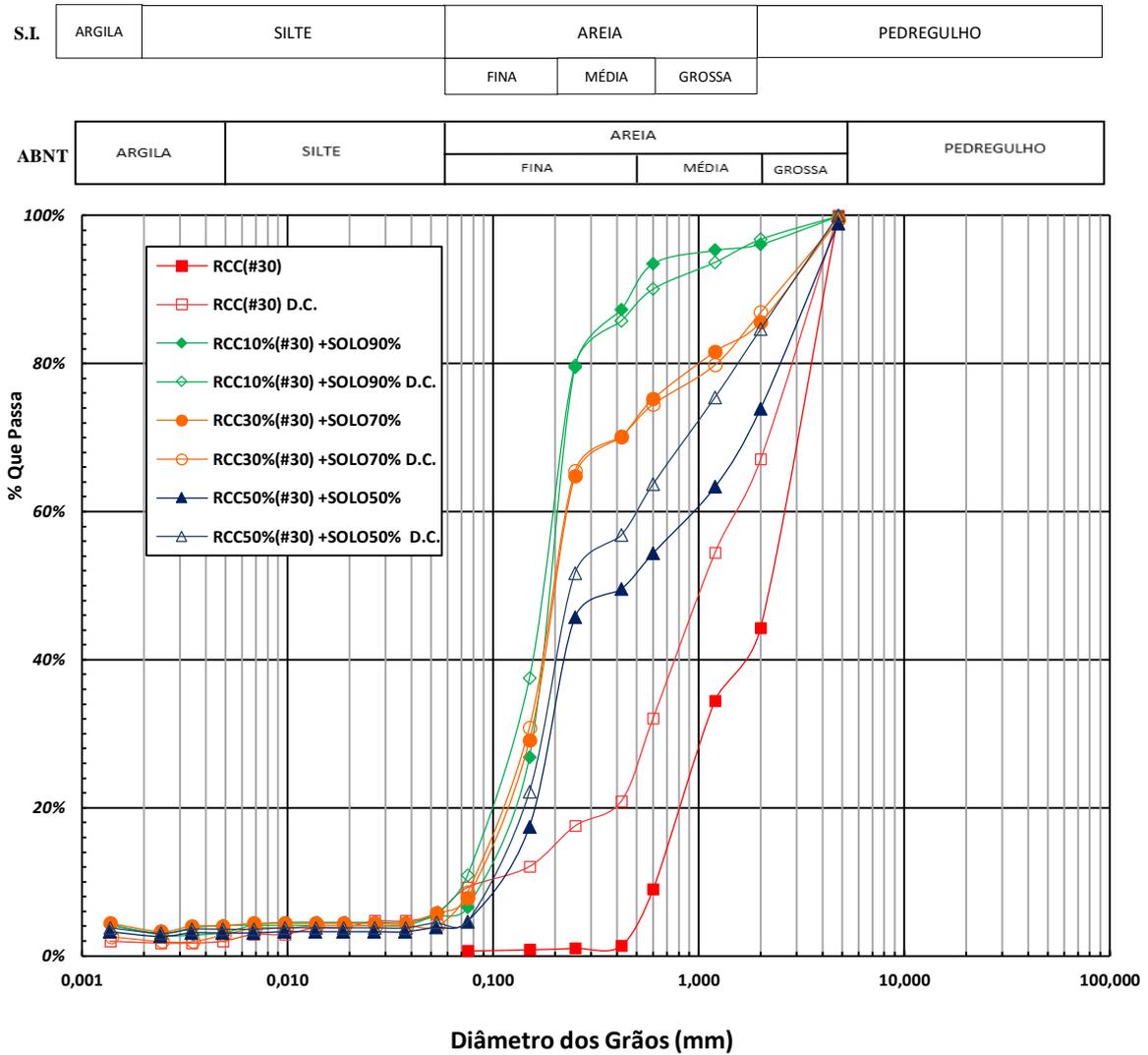


Figura 49 – Coeficiente de curvatura e uniformidade das amostras deste estudo, antes e depois da compactação.

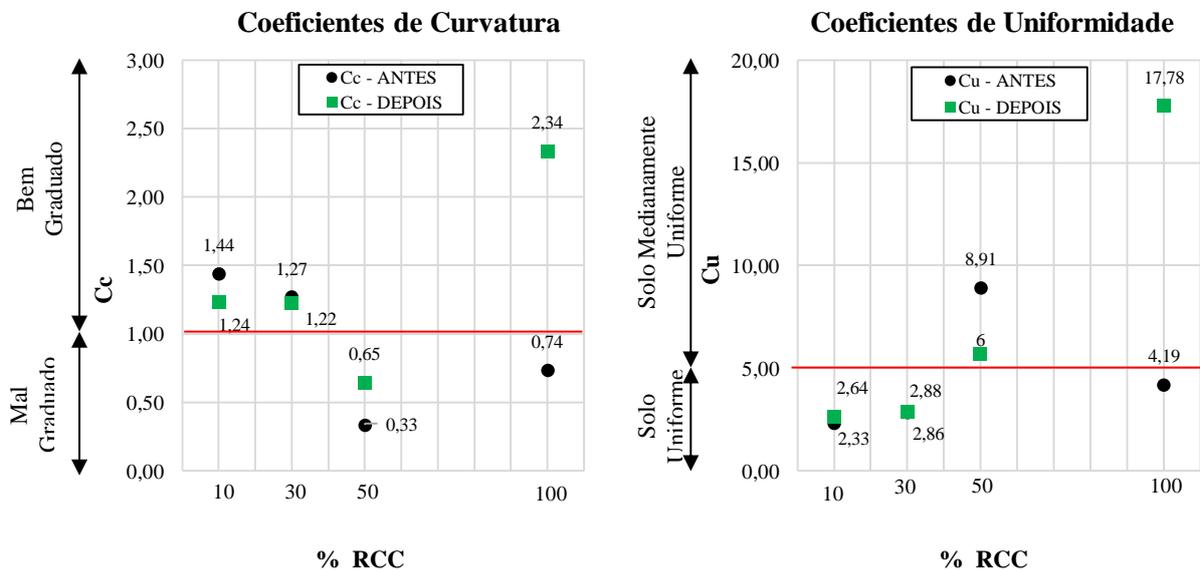


Tabela 14 - Percentual das frações por constituintes depois da compactação (D.C.).

Fração Granulométrica	Amostras			
	RCC _(#30) D.C.	RCC _{#30} 10% + Solo 90%	RCC _{#30} 30% + Solo 70%	RCC _{#30} 50% + Solo 50%
	(%)	D.C. (%)	D.C. (%)	D.C. (%)
	(%)	(%)	(%)	(%)
Pedregulho	0	0	0	0
Areia Grossa	33	4	13	16
Areia Média	46	10	20	26
Areia Fina	16	79	60	53
Silte	3	3	3	1
Argila	2	4	4	4

De acordo com a Figura 49, a compactação só teve influência significativa na granulometria da mistura com 50% RCC_{#30} e na amostra de RCC_{#30}, nas demais amostras não houve alterações expressivas. A consequência da compactação contribuiu para o processo de cominuição do material, deixando a amostra com RCC_{#30} com uma melhor distribuição granulométrica, como mostra a Tabela 14. Isso ocorreu devido a presença de material cerâmico no RCC_{#30}, que é menos resistente à compactação. Verificou-se ainda, a exemplo da mesma amostra que passou da classificação mal graduada para bem graduada, de acordo com o SUCS. Uma comparação dos valores de C_c e C_u, antes e depois a compactação, de todas as amostras da pesquisa está apresentada conforme ilustra a Figura 49.

4.2 Caracterização Mecânica

4.2.1 Ensaios Edométricos

Os ensaios edométricos simples e duplos foram realizados em amostras amolgadas de solo e RCC_{#30}. No solo de Petrolina foram realizados por Veríssimo (2015) onde foram utilizados vinte e sete corpos de prova para uso no ensaio edométrico simples e dezoito para os edométricos duplos. Para as misturas, desta pesquisa, foram confeccionados e compactados 81 (oitenta e um), onde foram compactados para uso em ensaios edométricos simples e 54 (cinquenta e quatro) corpos de prova, para ensaios edométricos duplos. Todos corpos de prova nas proporções definidas de 10, 30 e 50% de RCC_{#30} e umidades pré-determinadas.

4.2.1.1 Edométrico Simples

Os valores dos índices físicos dos corpos de prova, que foram previamente umedecidos e compactados nas condições estabelecidas, antes de serem inundados, nas condições iniciais e finais, das amostras de solo e misturas com RCC_{#30} estão apresentados no Apêndice A.

Considerando as condições iniciais dos corpos de prova, os menores pesos específicos aparente seco foram obtidos nos menores valores de umidade inicial natural, acarretando em menores índice de vazios inicial e final. Isto, ocasionados pelo aumento do grau de compactação, onde influenciou diretamente aumentando o peso específico aparente seco das amostras com 90 e 95%, mesmo comportamento devido ao acréscimo da umidade para 4 e 7%, próximo da umidade ótima do solo. O grau de saturação final em algumas amostras excedeu 100%, o que pode ser explicado devido a uma pequena lâmina de água destilada que ficou sobre o papel filtro e solo ao final de alguns ensaios, não havendo assim uma perfeita drenagem das amostras ensaiada.

Os valores dos índices físicos iniciais dos corpos de prova para cada conjunto de amostras foram semelhantes, indicando que o processo de compactação e o controle de umidade permitiram obter corpos de prova, com pesos específicos aparentes secos e umidades muito próximos aos desejados bem como repetições deles – pesos específicos.

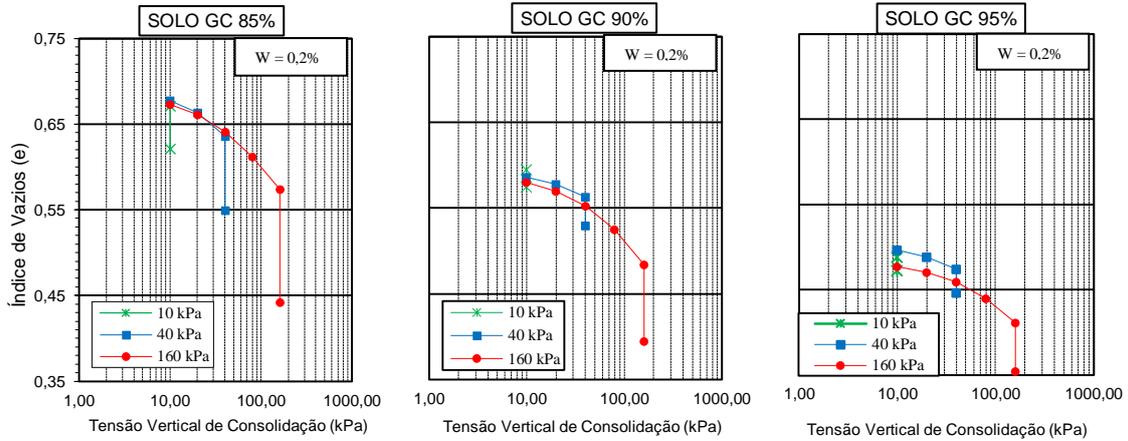
A variação dos pesos específicos aparente seco máximo das amostras pouco variou em relação ao mesmo grau de compactação (Tabela 15).

Tabela 15 – Variação dos pesos específicos aparente seco das amostras estudadas.

Grau de Compactação (%)	$\gamma_{\text{máx.}}$ (kN/m³)
85	15,62 ± 0,18
90	16,48 ± 0,20
95	17,44 ± 0,20

As figuras típicas da variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação (e x $\Delta v - \log$) de todas as amostras compactadas nas condições de umidade natural 0,2% (solo) e 1% (misturas) e nos teores de umidade próximos de 4 e 7% para os graus de compactação de 85, 90 e 95%, são mostrados nas Figuras 50 a 52, respectivamente. Nessas figuras os resultados referentes ao solo colapsível foram realizados por Veríssimo (2015).

Figura 50 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade natural, nos diferentes Graus de Compactação (GC).



Fonte: Veríssimo (2015).

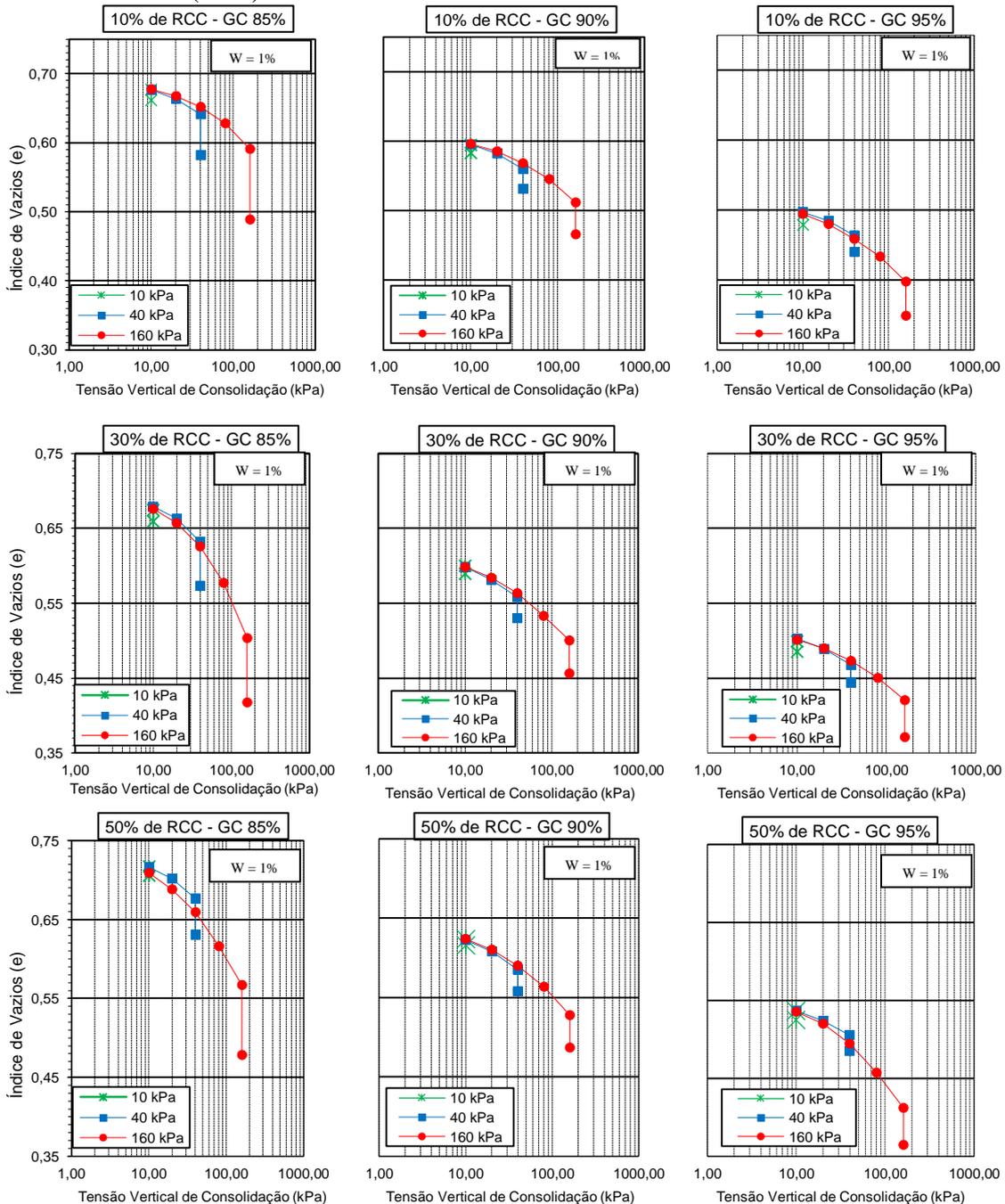
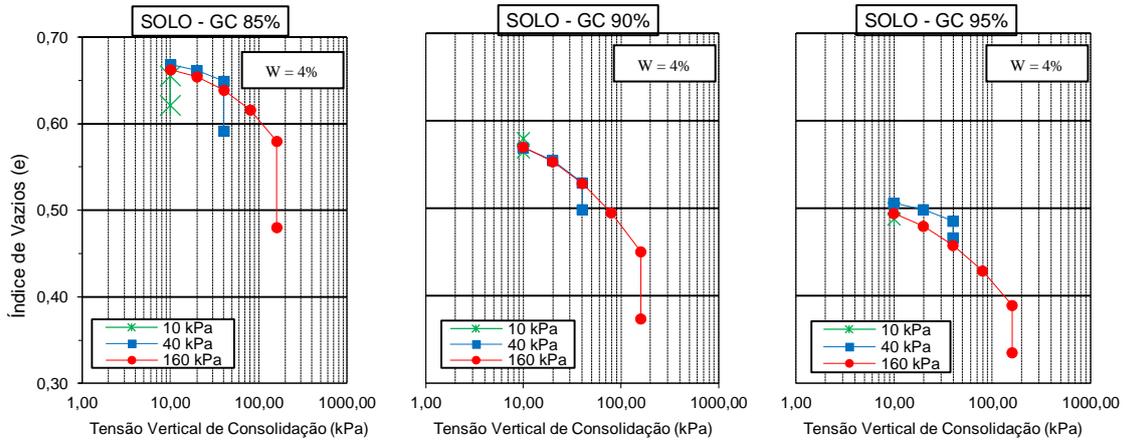


Figura 51 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade de 4%, nos diferentes Graus de Compactação (GC).



Fonte: Veríssimo (2015).

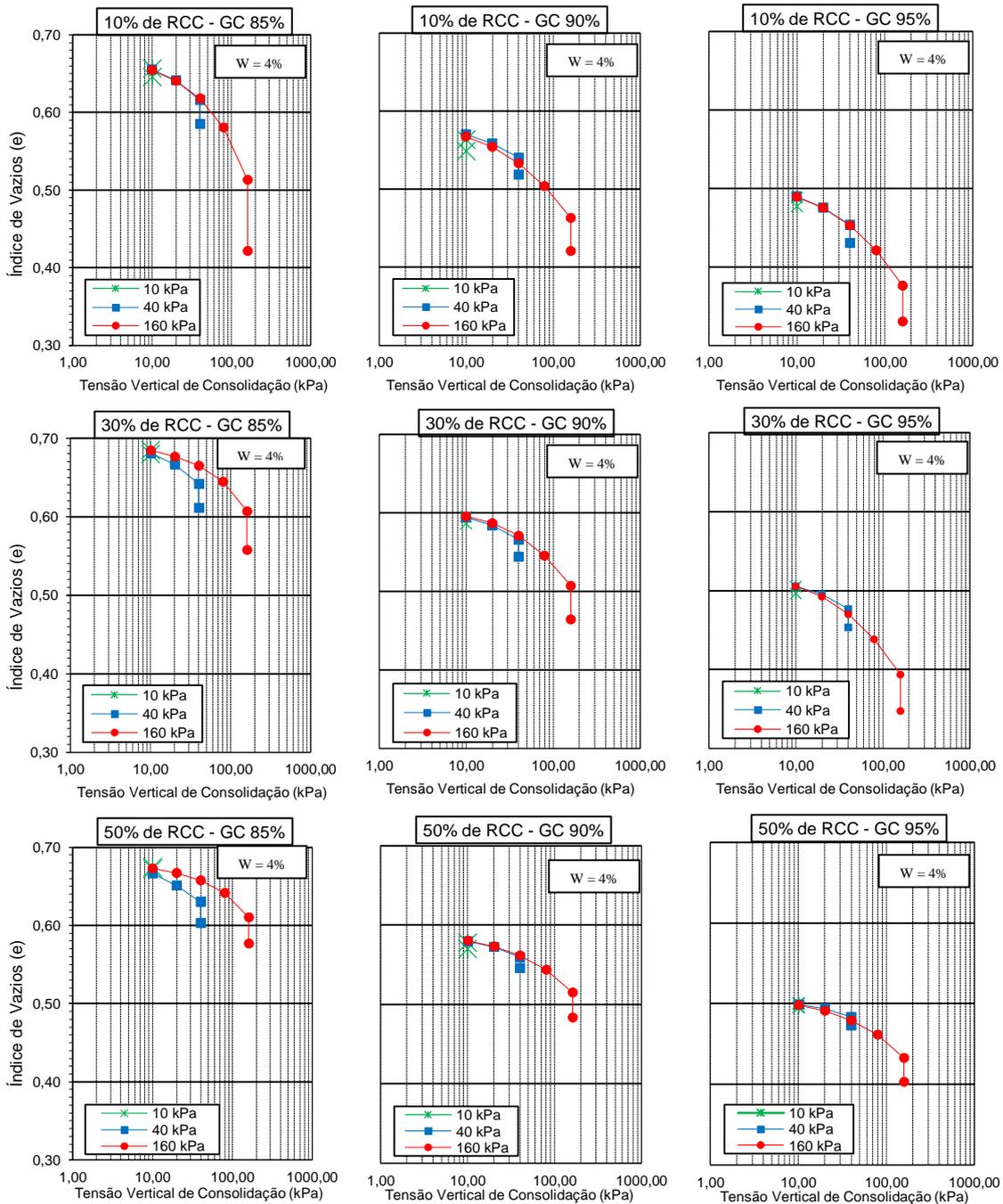
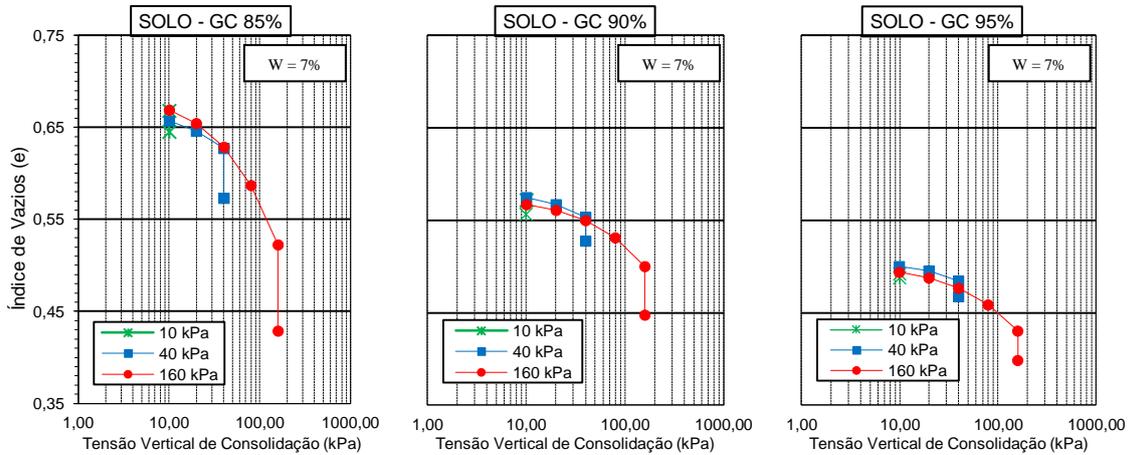
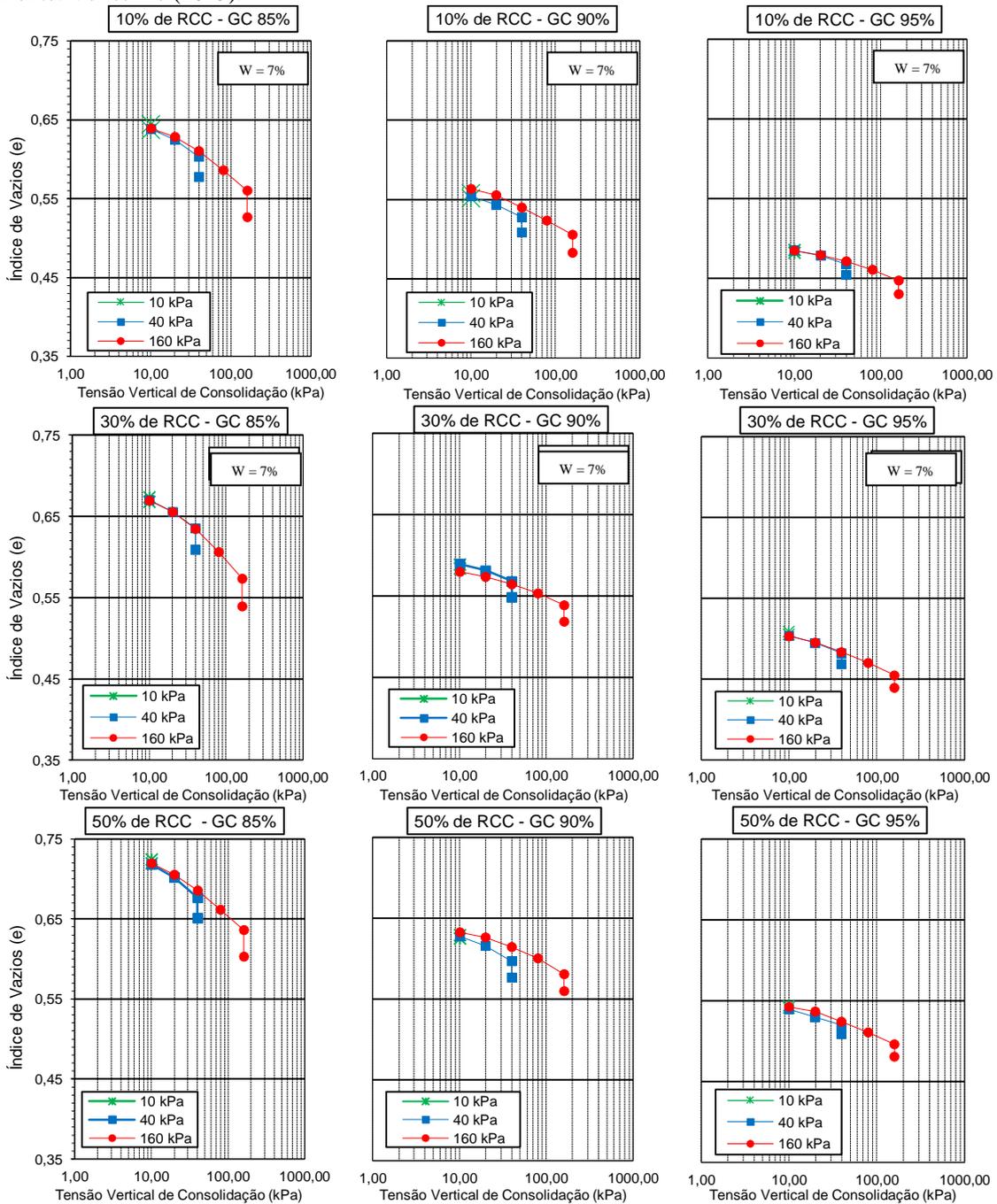


Figura 52 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação na umidade de 7%, nos diferentes Graus de Compactação (GC).



Fonte: Veríssimo (2015).



Para uma mesma umidade inicial, com o aumento da tensão, e para uma mesma tensão vertical de consolidação, os índices de vazios decresceram em todas as amostras com o aumento do grau de compactação e umidade. Verificou-se também redução do colapso das amostras de solo com resíduos (misturas) quando comparado ao solo, onde, ao aumentar a proporção de RCC_{#30}, conferiu nas misturas uma estrutura mais estável quando inundadas, obtendo melhores resultados nas amostras com 50% de RCC_{#30} e com umidade de 7%. Isto pode ser explicado pelo fato das misturas apresentarem melhor entrosamento dos grãos com o acréscimo da faixa granulométrica definida de RCC_{#30} ao solo colapsível, que apresentava uma desuniformidade em sua granulometria.

4.2.1.2 Potencial de Colapso

Os valores dos potenciais de colapso ($CP (\%) = (\Delta H/H_i) \times 100$, onde ΔH é a variação da altura do corpo de prova devido à inundação e H_i é a altura inicial do corpo de prova antes da inundação) para as tensões verticais de inundação de 10, 40 e 160kPa dos ensaios edométricos simples, estão apresentados nas Tabelas 16 a 18.

Tabela 16 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade inicial solo (0,2%) e Misturas (1%) (Edométrico Simples).

Potenciais de Colapso (%) em diferentes Tensões Verticais de Inundação (kPa) e Graus de Compactação(%)									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
Solo (Veríssimo, 2015)	3,02	1,26	1,06	5,29	2,14	1,91	8,38	5,99	4,05
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	0,94	0,74	1,01	3,61	1,86	1,64	6,47	3,05	3,52
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	0,92	0,65	0,95	3,57	1,79	1,59	5,72	2,92	3,46
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	0,64	0,51	0,75	2,75	1,73	1,36	5,65	2,71	3,35

Tabela 17 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade de 4% (Edométrico Simples).

Potenciais de Colapso (%) em diferentes Tensões Verticais de Inundação (kPa) e Graus de Compactação(%)									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
Solo (Veríssimo, 2015)	2,04	0,95	0,75	3,52	2,01	1,28	6,32	5,26	3,84
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	0,66	0,91	0,72	1,90	1,56	1,56	6,06	2,88	3,33
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	0,29	0,54	0,56	1,85	1,38	1,52	3,06	2,83	3,32
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	0,14	0,50	0,34	1,66	0,86	0,74	2,08	2,10	2,09

Tabela 18 - Potenciais de colapso das amostras estudadas na umidade de 7% (Edométrico Simples).

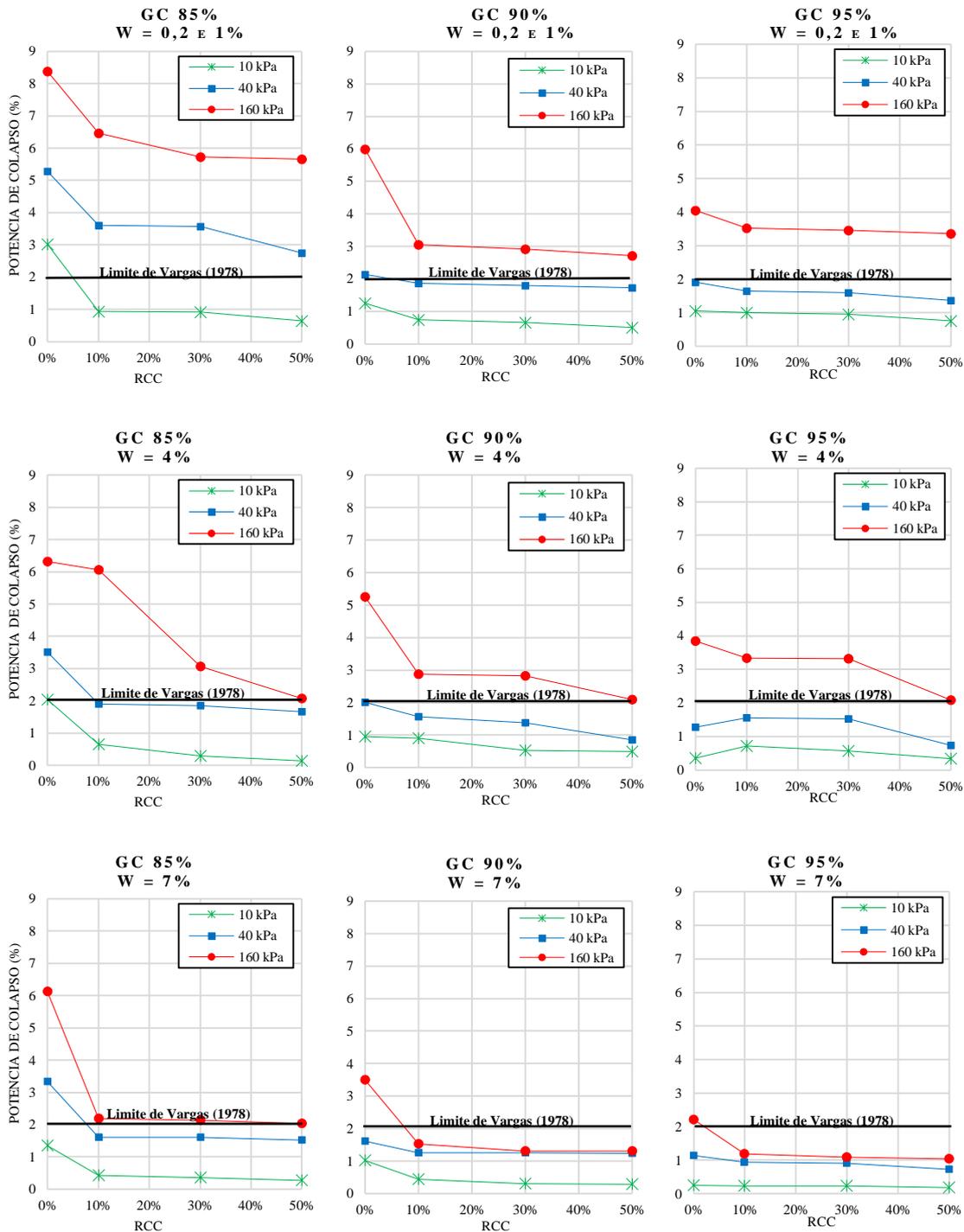
Potenciais de Colapso (%) em diferentes Tensões Verticais de Inundação (kPa) e Graus de Compactação (%)									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
Solo (Veríssimo, 2015)	1,35	1,01	0,25	3,33	1,61	1,14	6,13	3,50	2,20
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	0,43	0,44	0,23	1,61	1,25	0,94	2,18	1,52	1,19
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	0,35	0,30	0,24	1,60	1,25	0,91	2,14	1,31	1,09
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	0,27	0,29	0,18	1,52	1,24	0,72	2,03	1,30	1,04

No que se refere aos dados obtidos para as amostras de solo, os potenciais de colapso crescem com o acréscimo da tensão, atingindo maiores resultados na umidade inicial do solo, alcançando um valor máximo de 8,38% na tensão de 160 kPa e grau de compactação de 85% (Tabela 16). Com o aumento do grau de compactação para um mesmo valor de umidade, para uma mesma tensão vertical de consolidação, nas amostras do solo há uma redução do potencial de colapso, chegando a valores até 82% inferiores na amostra com GC de 85%, tensão de 10kPa e umidade de 4%. Também foi observado que o potencial de colapso decresce para uma mesma tensão vertical de consolidação quando se aumenta o grau de compactação para qualquer amostra, seja solo, seja mistura.

Comportamento similar foi observado para as misturas, onde as reduções do potencial de colapso acontecem com o aumento do grau de compactação para uma mesma amostra, que também foram nas menores tensões verticais de consolidações. Com relação aos maiores potenciais de colapso, as misturas com 30% de RCC_{#30} e 50% de RCC_{#30} obtiveram valores mais elevados 5,72% e 5,65%, respectivamente, na mesma tensão (160 kPa), na umidade de 1% e grau de compactação de 85%. Enquanto que o potencial de colapso da mistura de RCC_{#30} 10% atinge valor máximo de 6,47% em 160 kPa no mesmo grau de compactação, também na umidade de 1%, logo em seguida decrescendo, como mostra a Tabela 18, com os menores valores de forma geral.

As amostras não apresentam um comportamento de pico, ou seja, não existe uma tensão crítica para um colapso máximo, o que ocorre é o crescimento do potencial de colapso com a tensão vertical de consolidação. A variação dos potenciais de colapso com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas está apresentada na Figura 53. Assim, como o limite para identificar o comportamento colapsível dos solos de Vargas (1978), onde considera que um solo é colapsível quando o valor de CP for maior que 2%.

Figura 53 -Variação dos potenciais de colapso das amostras nas umidades e graus de compactação estudados (Edométrico Simples).



Segundo o critério de Vargas (1978), que considera um solo colapsível com potencial de colapso superior a 2%, foi observado que os potenciais de colapso do solo estudado foram superiores a este limite, confirmando a colapsibilidade do mesmo. Com a umidade inicial o solo deixa de ser colapsível a partir do acréscimo de 10% de RCC_{#30} e grau de compactação de 90% e 95% e, nas tensões de 10 kPa e 40 kPa. Com o acréscimo de 4% de umidade, o percentual de colapso decresce também com o acréscimo de 10% de RCC_{#30} e GC de 85%, obtendo menores valores no GC de 90%, com exceção nas misturas com 10% de RCC_{#30} e 30% de RCC_{#30},

umidade de $w = 4\%$ e grau de compactação de 95%, onde apresentaram aumento da colapsibilidade em relação ao solo, nas tensões de 10 kPa e 40kPa. Na umidade inicial de 7%, os valores também decrescem com o acréscimo de 10% de $RCC_{\#30}$, com grau de compactação de 85% e em todas as tensões estudadas, obtendo o mesmo resultado para 90% e melhor resultado com grau de compactação de 95%.

Com base nos resultados dos ensaios edométricos simples, foram calculados os percentuais de redução de colapso das misturas em relação ao solo colapsível estudado, onde são apresentados a seguir na Tabela 19.

Tabela 19 –Valores de redução dos potenciais de colapso das misturas estudadas (Edométrico Simples).

Percentuais de redução de Colapso (%)									
Umidade 1%									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	68,9	41,3	4,7	31,8	13,1	14,1	22,8	49,1	13,1
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	69,5	48,4	10,4	32,5	16,4	16,8	31,7	51,3	14,6
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	78,8	59,5	29,2	48,0	19,2	28,8	32,6	54,8	17,3
Umidade 4%									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	67,6	4,2	+100	46,0	22,4	+21,9	4,1	45,2	13,3
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	85,8	43,2	+55,6	47,4	31,3	+18,8	51,6	46,2	13,5
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	93,1	47,4	5,6	52,8	57,2	42,2	67,1	60,1	45,6
Umidade 7%									
Amostras	10 kPa			40 kPa			160 kPa		
	85	90	95	85	90	95	85	90	95
RCC _{#30} 10% + Solo 90%	68,1	56,4	8,0	51,7	22,4	17,5	64,4	56,6	45,9
RCC _{#30} 30% + Solo 70%	74,1	70,3	4,0	52,0	22,4	20,2	65,1	62,6	50,5
RCC _{#30} 50% + Solo 50%	80,0	71,3	28,0	54,4	23,0	36,8	66,9	62,9	52,7

Os resultados indicam ainda que os potenciais de colapso das amostras nos ensaios edométricos simples são decrescentes com o acréscimo de $RCC_{\#30}$ para as tensões de consolidação com relação ao solo, alcançando maiores reduções no colapso para as amostras no menor grau de compactação (85%). O uso de 50% de $RCC_{\#30}$ no solo colapsível alcançou redução de 93% do potencial de colapso. Em sua maioria houve redução dos valores do potencial de colapso, porém

em alguns casos houve até mesmo aumento deste potencial, nas tensões de 10kPa e 40 kPa, grau de compactação de 95% e umidade de 4% das amostras com 10 % de RCC_{#30} e 50% de RCC_{#30}, como observado na Tabela 19.

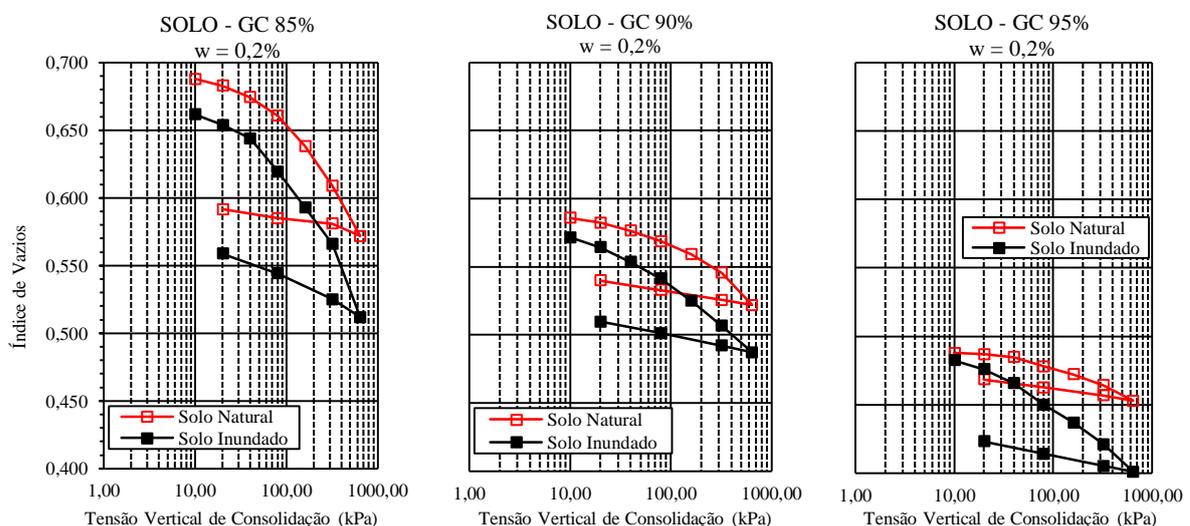
4.2.2 Ensaios Edométricos Duplos

Os índices físicos, nas condições iniciais (umidade natural) e finais (inundado), das amostras utilizadas nos ensaios edométricos duplos estão apresentadas no Apêndice A.

Assim, como nos ensaios edométricos simples as condições iniciais dos corpos de prova dos ensaios edométricos duplos, alcançaram os menores pesos específicos aparente seco no menor teor de umidade (0,2 e 1%), variando pouco nos índices de vazios finais, para as amostras inundadas. Isto, influenciado pelo aumento do grau de compactação, onde influenciou aumentando o peso específico aparente seco das amostras com 90 e 95%, como esperado, mesmo comportamento seguido no acréscimo da umidade para 4 e 7%, próximo da umidade ótima do solo. A umidade inicial e a tensão a que o solo está submetido têm importância significativa no comportamento de variação de volume quando o solo é inundado.

A variação do índice de vazios e a tensão vertical de consolidação de todas amostras compactadas na umidade inicial e inundadas, com água destilada, no início do ensaio, estão apresentadas, respectivamente nas Figuras 54 a 56.

Figura 54 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação, na umidade natural das amostras estudadas nas condições natural e inundado.



Fonte: Veríssimo (2015).

Figura 54 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação, na umidade natural das amostras estudadas nas condições natural e inundado (continuação).

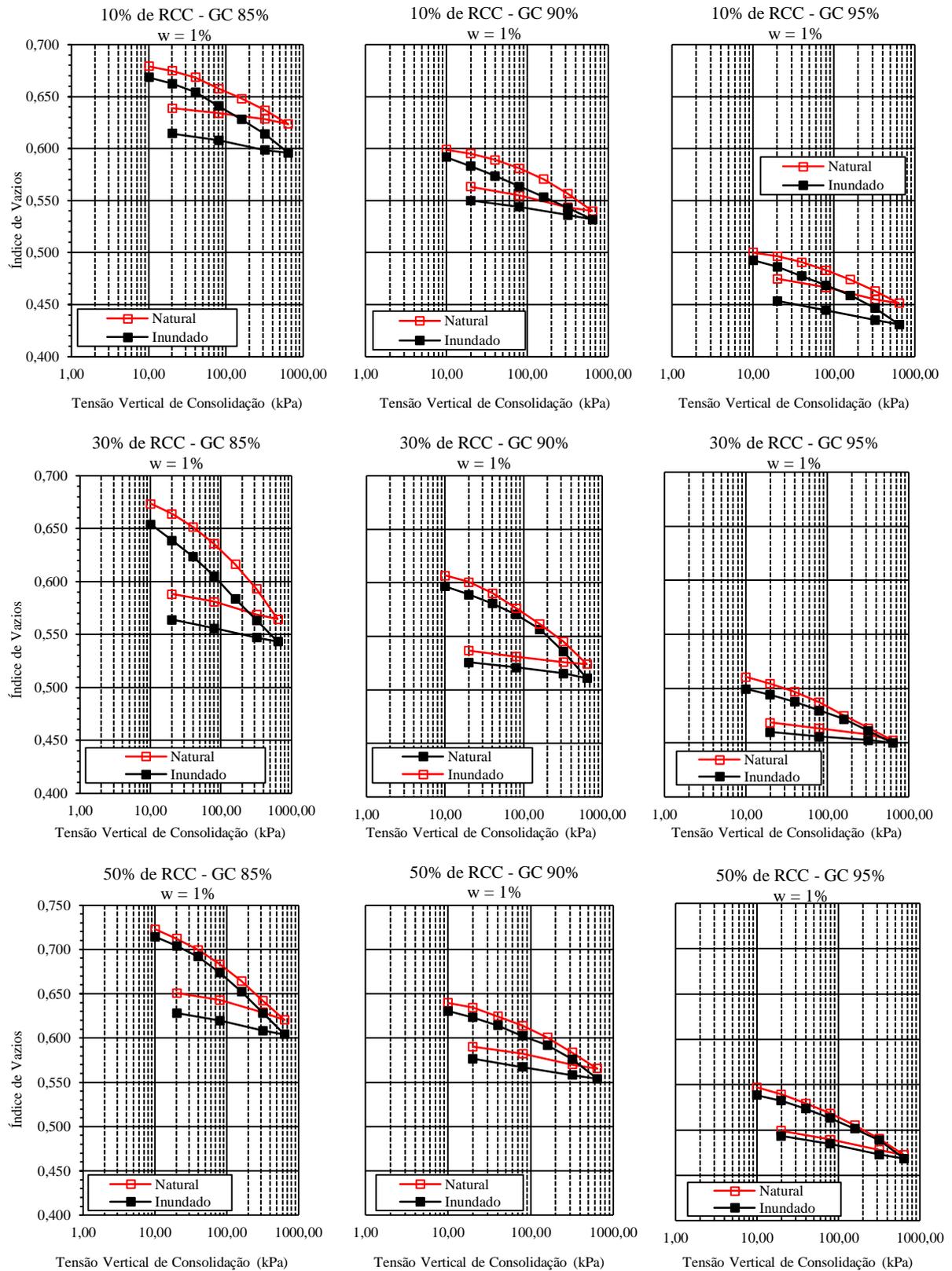
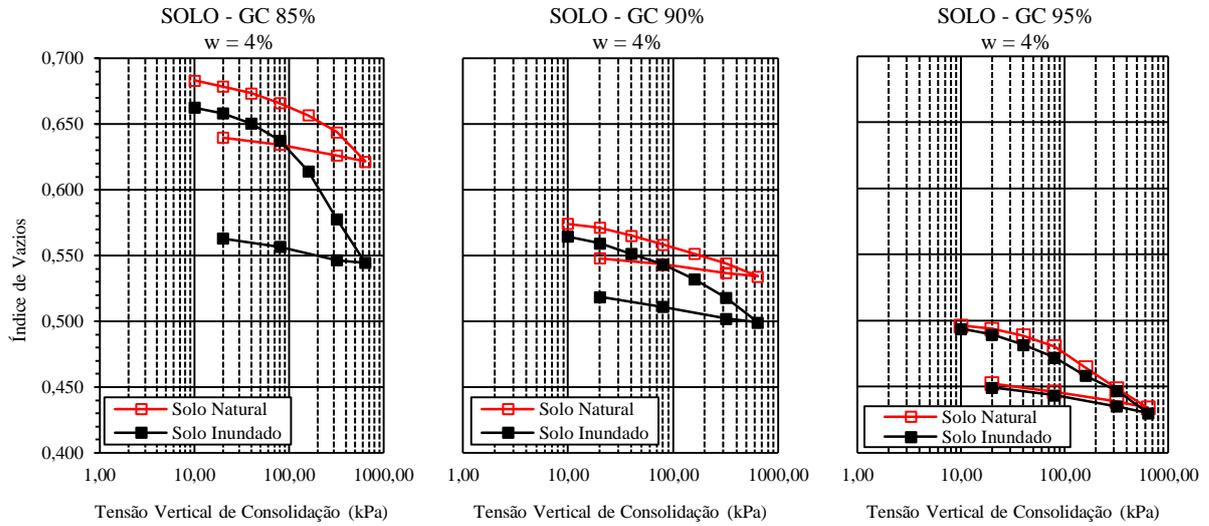


Figura 55 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4% nas condições natural e inundado.



Fonte: Veríssimo (2015).

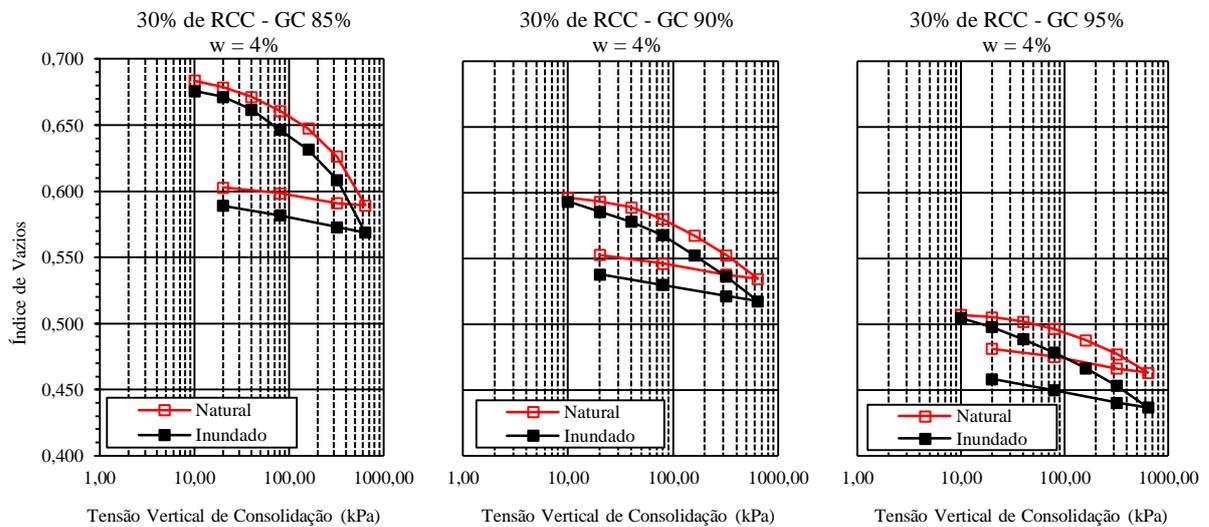
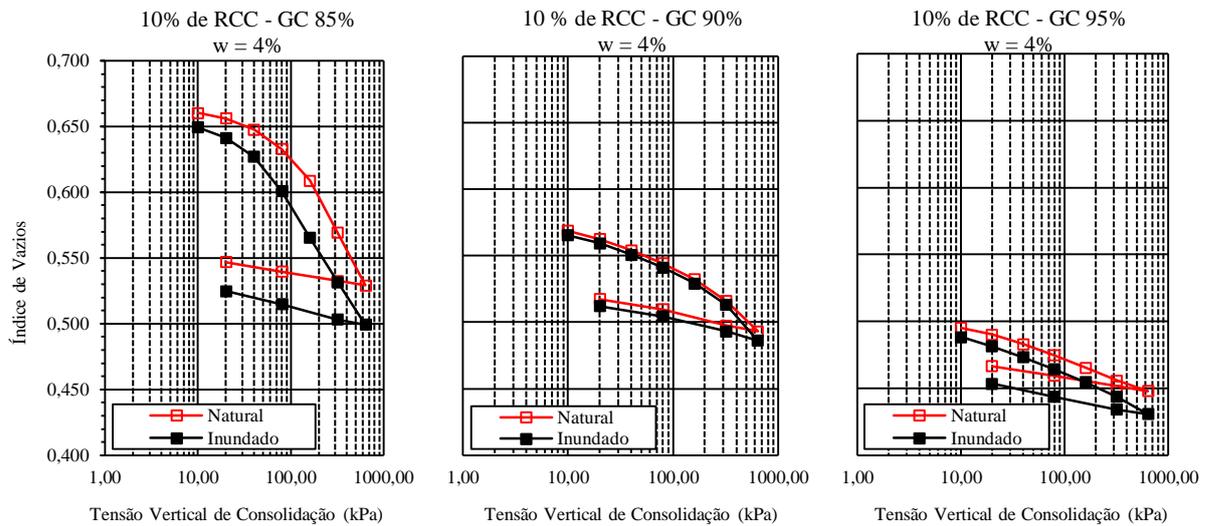


Figura 55 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4% nas condições natural e inundado (continuação).

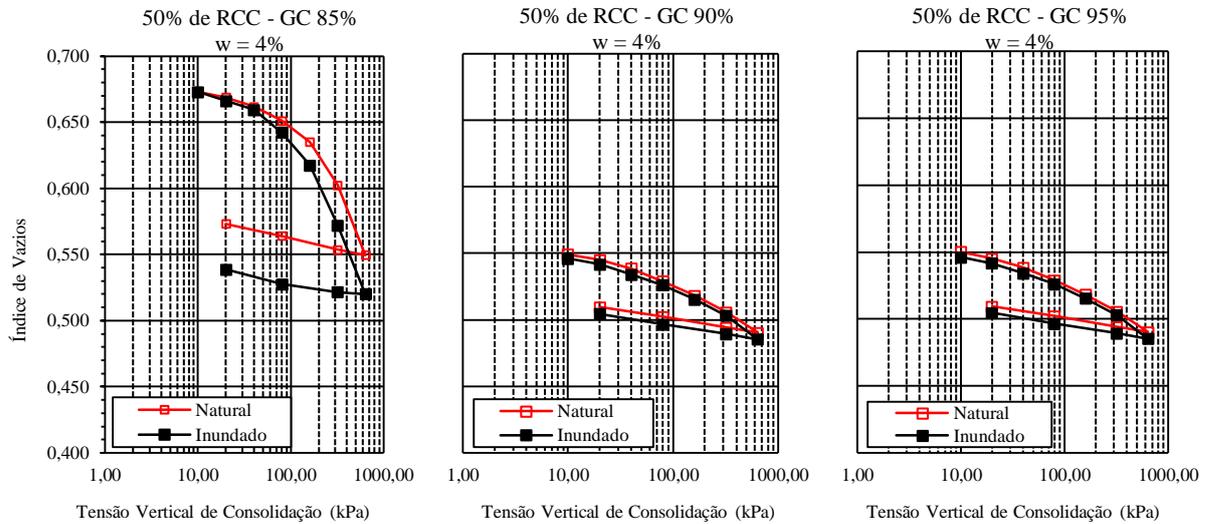
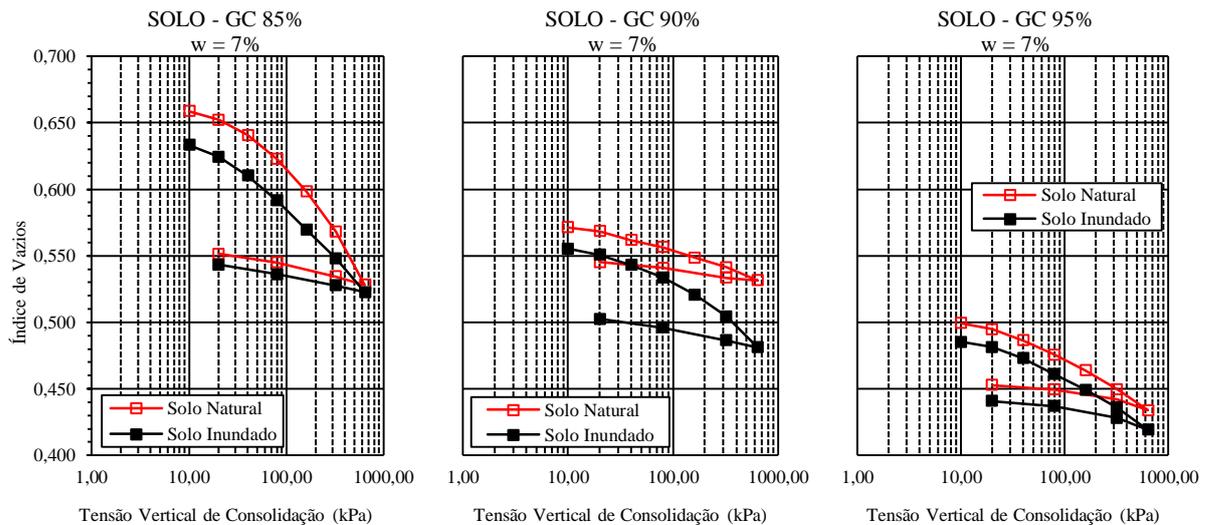


Figura 56 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7% nas condições natural e inundado.



Fonte: Veríssimo (2015).

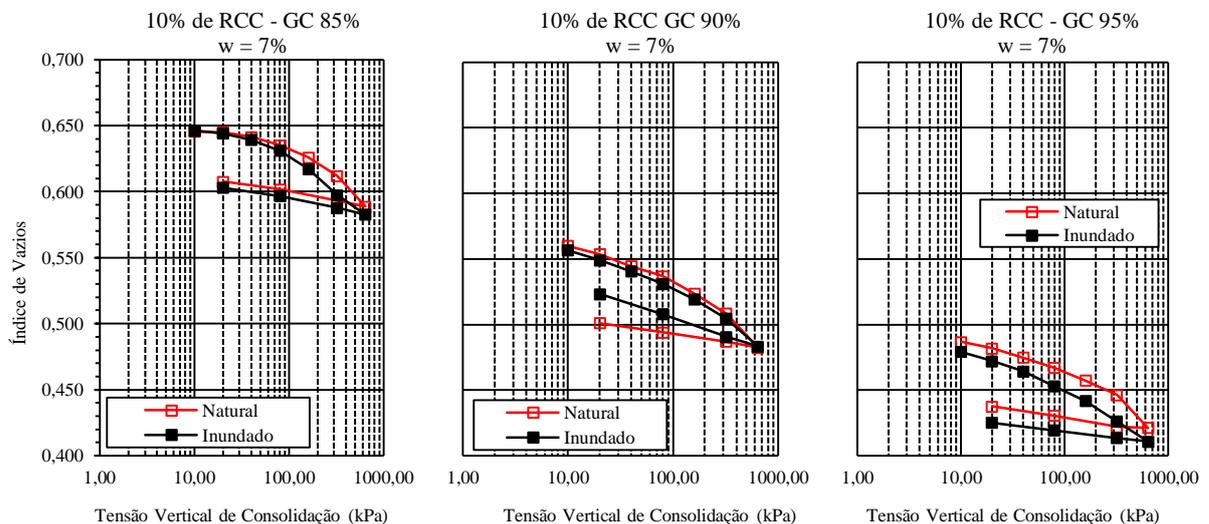
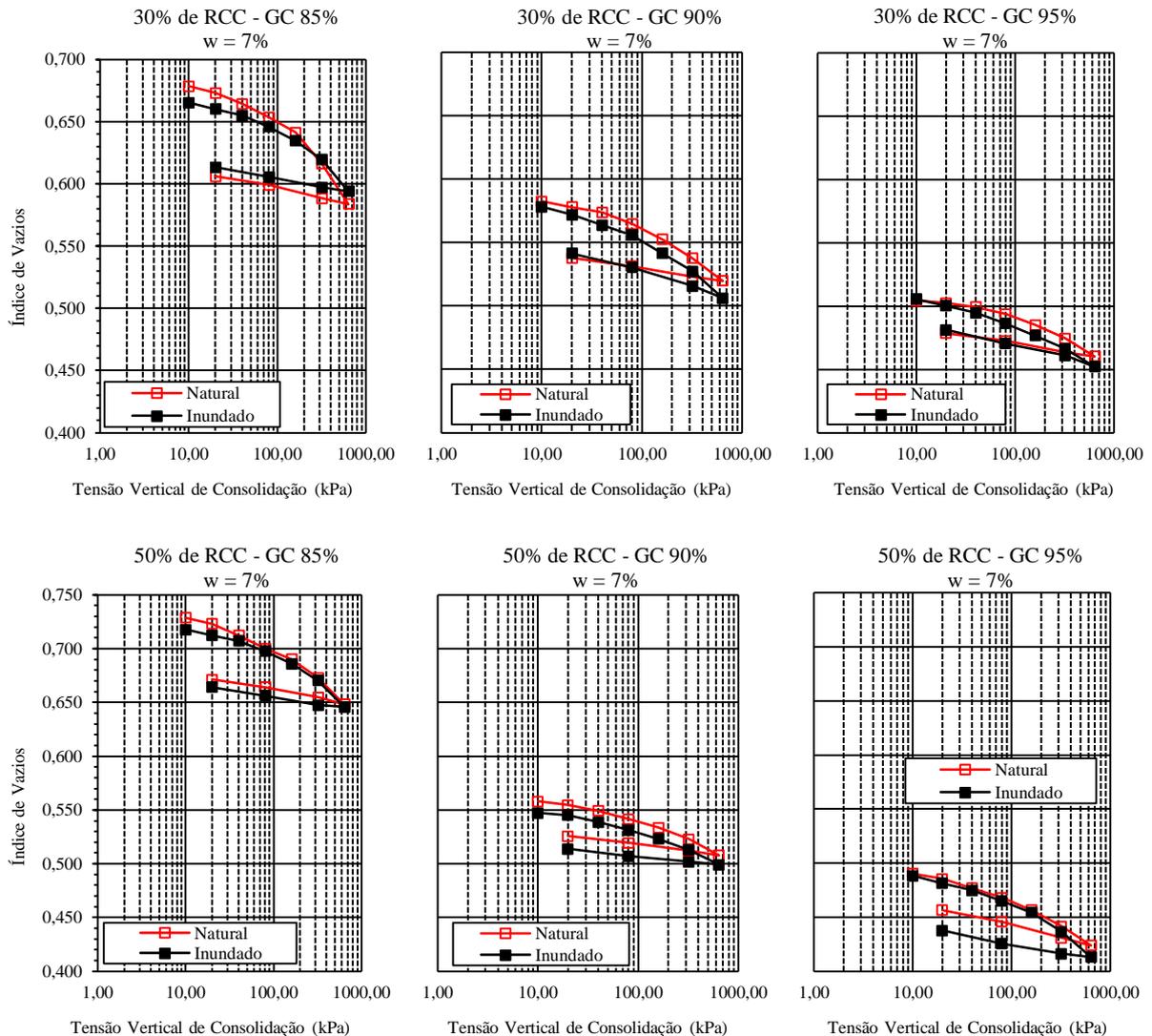


Figura 56 - Variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7% nas condições natural e inundado (continuação).



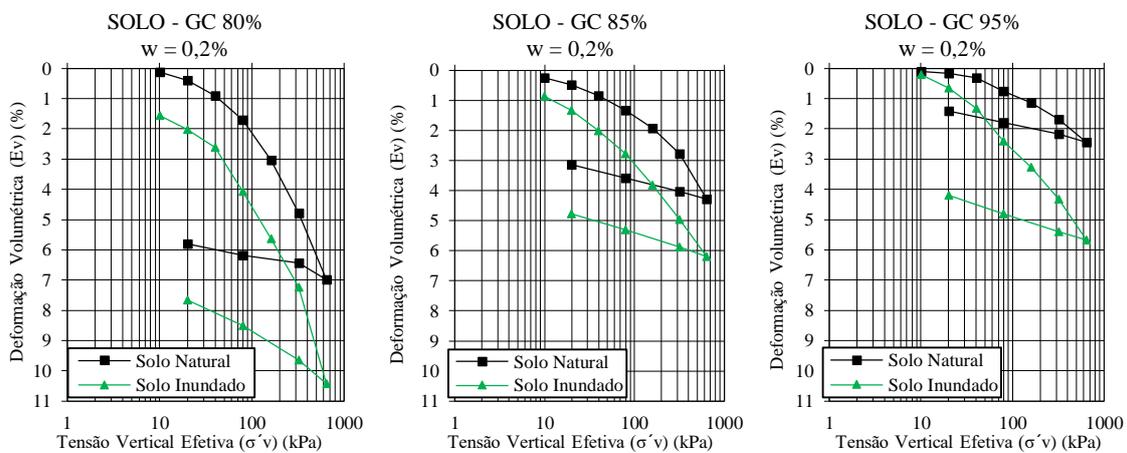
Nota-se que os parâmetros obtidos a partir dos ensaios na umidade natural foram inferiores aos obtidos a partir dos ensaios inundados. Para todos os Graus de Compactação e umidade, a compressibilidade na condição natural e inundado decresce com o acréscimo de RCC_{#30} e aumento da umidade inicial, porém são crescentes em relação ao acréscimo das tensões. Houve redução das deformações em todas amostras das misturas com o acréscimo do percentual de RCC_{#30} em relação ao solo.

As misturas com 7% de umidade obtiveram menores variações em relações as curvas dos ensaios natural e inundados, sendo observado comportamento com pequena alteração dos índices de vazios e valores mais baixos na tensão de consolidação (640kPa) nas misturas não inundadas, principalmente nas amostras com menor grau de compactação. Observa-se nas Figuras acima uma diferença das curvas de compressibilidade quando as amostras se encontram na

condição de umidade natural e quando está inundada. Esta diferença indica a variação do índice de vazios, caracterizando o colapso da amostra no acréscimo das tensões aplicadas.

Os gráficos da deformação volumétrica específica versus tensão vertical de consolidação (ϵ_v x $\sigma_v \log$), obtidos nos ensaios em amostras nas umidades iniciais (constante) de 0,2%, 1%, 4% e 7%, e inundados, são mostrados nas Figuras 57 a 59.

Figura 57 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação, na umidade inicial de 0,2% para o Solo e 1% para as misturas de solo com RCC#30.



Fonte: Veríssimo (2015).

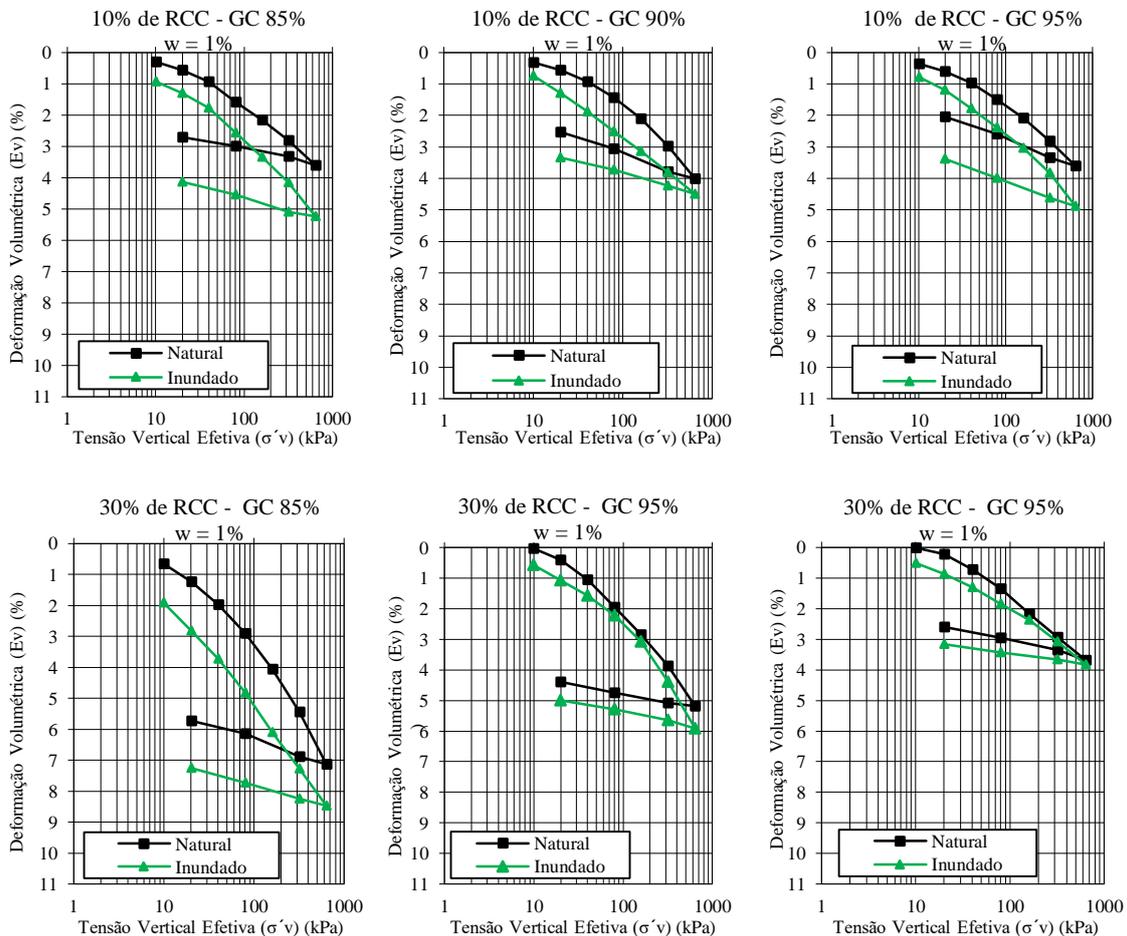


Figura 57 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação, na umidade inicial de 0,2% para o Solo e 1% para as misturas de solo com RCC#30(continuação).

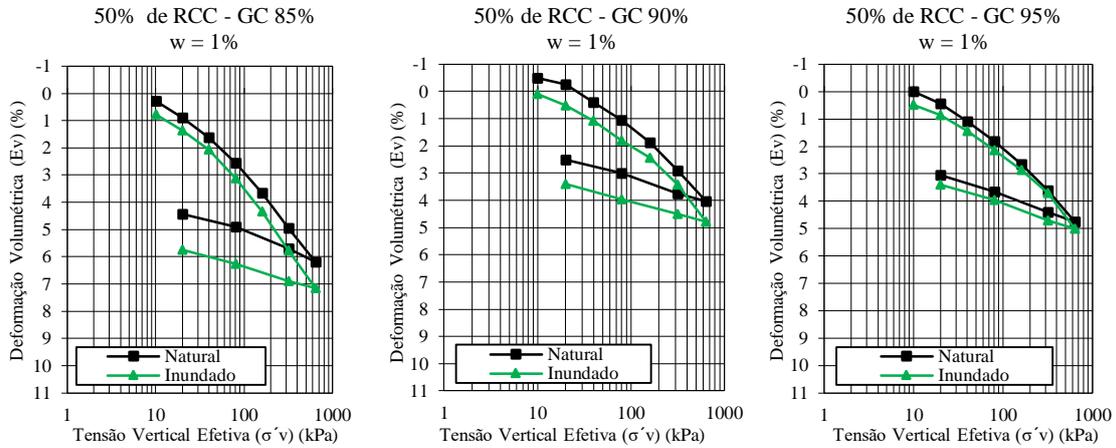


Figura 58 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4%.

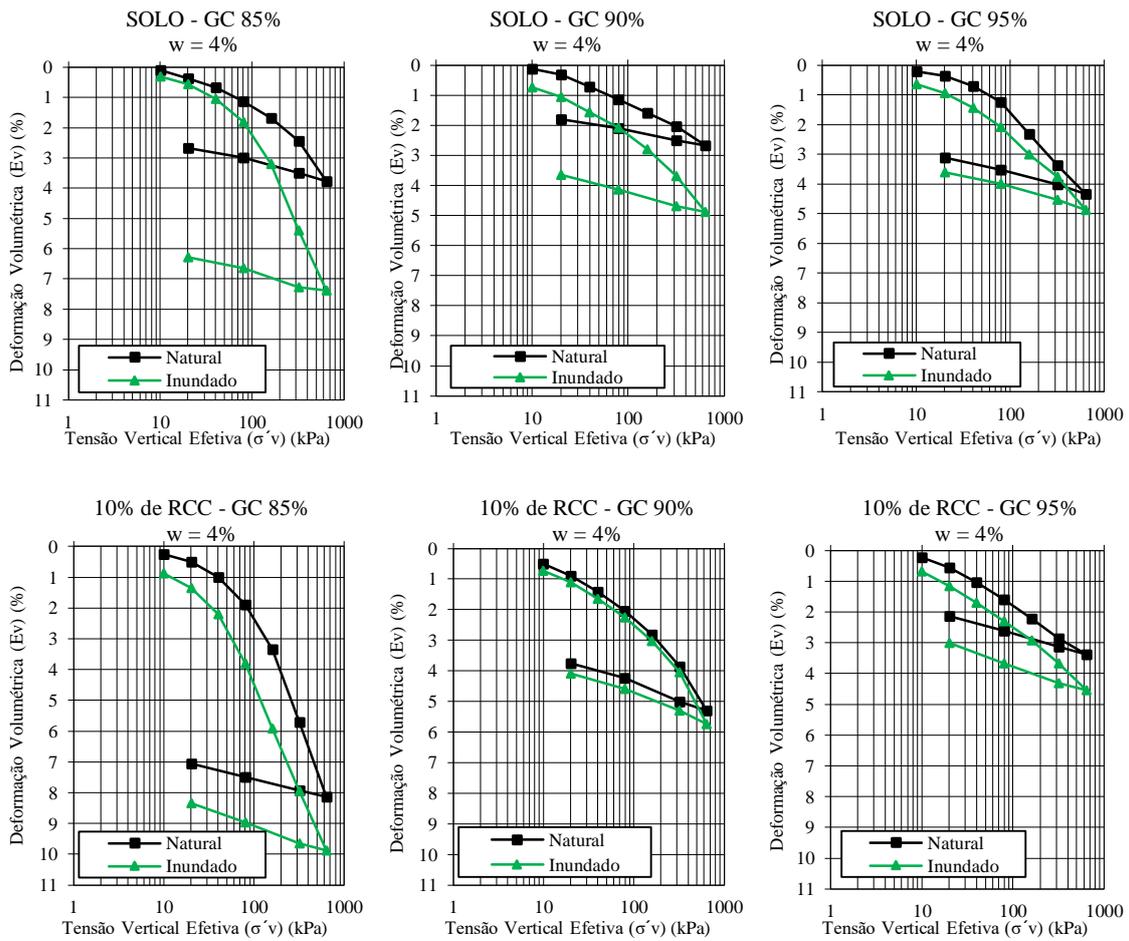


Figura 58 - Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 4% (continuação).

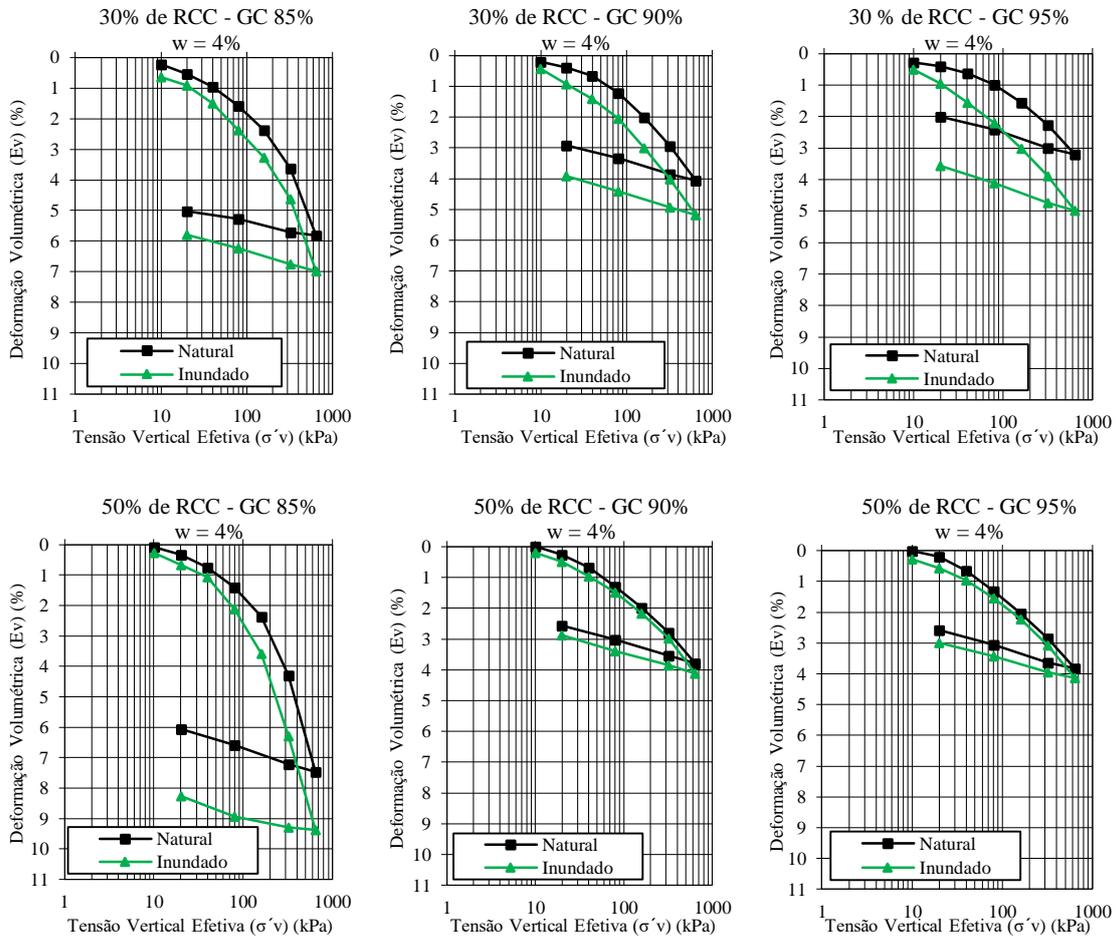


Figura 59 – Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7%.

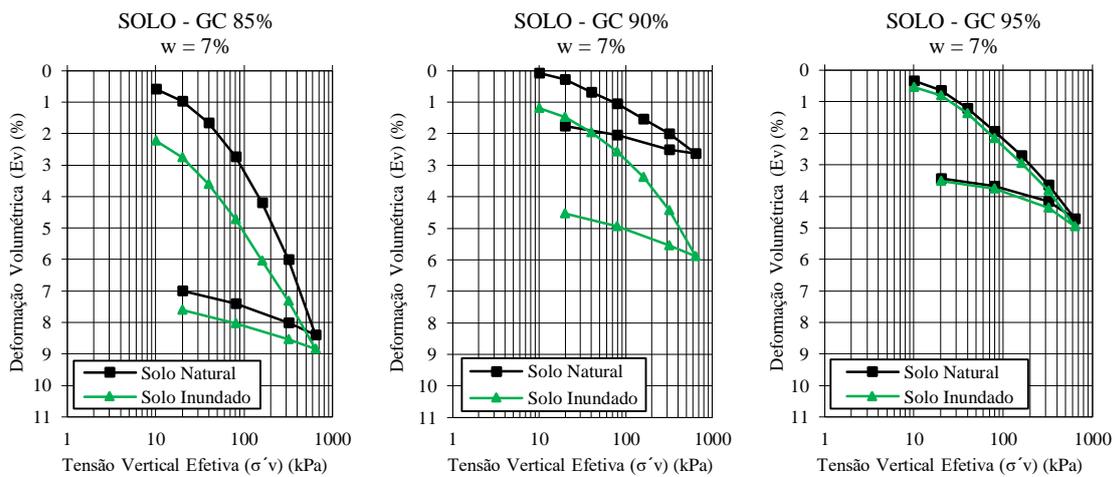
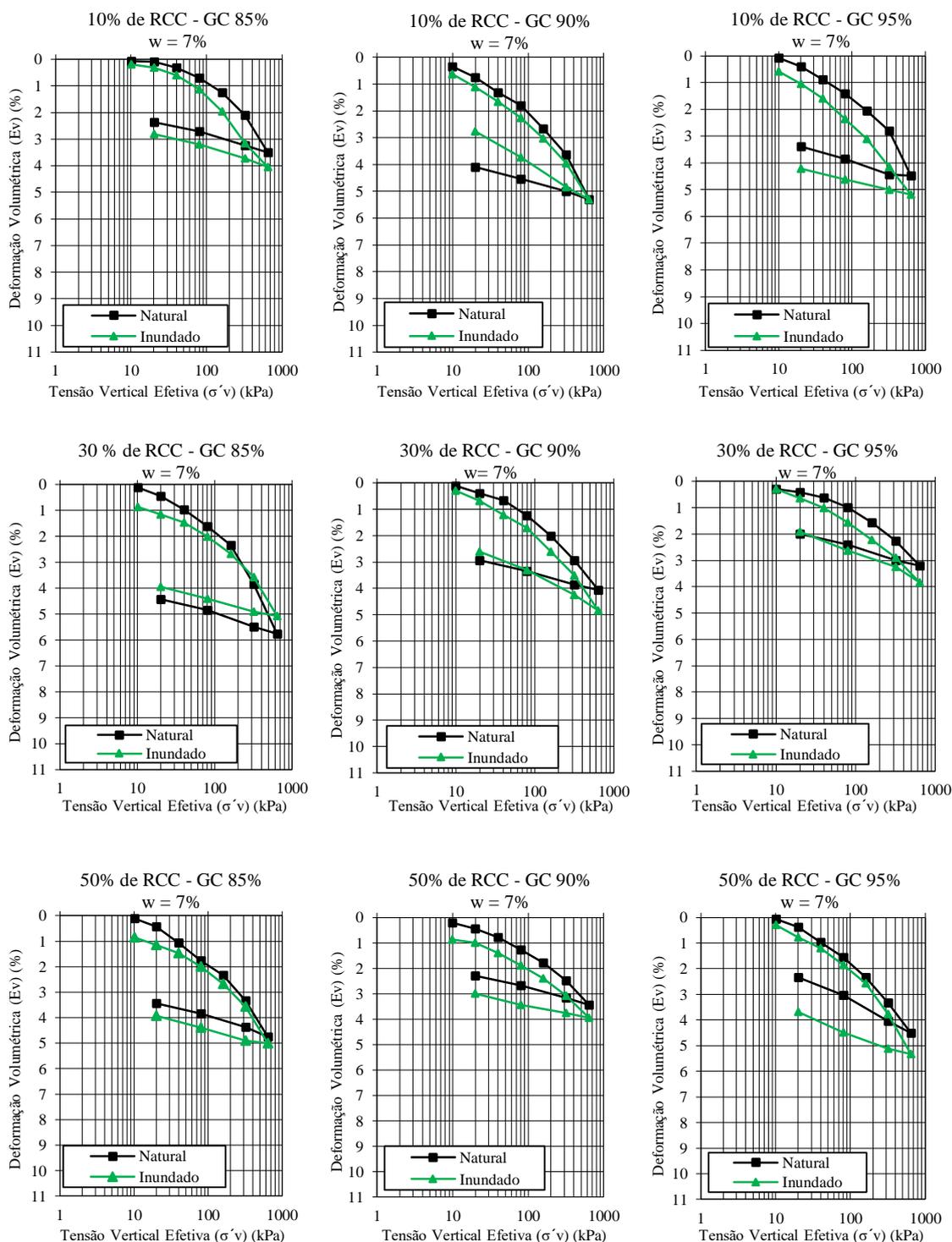


Figura 59 – Variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas, na umidade de 7% (continuação).



O comportamento esperado e identificado para a maioria das amostras foram maiores deformações das amostras na condição inundada comparadas a condição natural. Entretanto, algumas amostras (Solo, GC 95% e $w = 0,2\%$; Solo, GC 85% e $w = 4\%$; 10% RCC_{#30}, GC 90% e $w = 4\%$; 30% RCC_{#30}, GC 95% e $w = 4\%$; 30% RCC_{#30}, GC 95% e $w = 7\%$ e 30% RCC_{#30}, GC 95% e $w = 4\%$), na umidade inicial de ensaio, não apresentaram deformação inicial, ao

serem condicionadas à tensão vertical inicial de consolidação. Já as demais apresentaram deformações iniciais tanto para as amostras inundadas, quanto para não inundadas.

O acréscimo de resíduo ao solo reduziu significativamente as deformações volumétricas corroborando com esse comportamento o aumento do grau de compactação e umidade. A variação da deformação volumétrica específica com a tensão vertical de consolidação mostrou que o solo obteve menor deformação ao ser inundado na umidade inicial de 4% e grau de compactação de 90%, deformando 4,87%, com acréscimo da tensão vertical (até 640kPa). A mistura 10% de RCC_{#30}, GC de 90% na umidade de 7% quando inundada apresentou menor deformação de obteve 4,04% % no final do carregamento de 640kPa; quando inundada a mistura com 30% de RCC_{#30}, 3,82% com GC de 95% e $w = 7\%$ e para a mistura com 50% de RCC_{#30}, que obteve a menor deformação com 3,96%, na umidade de 7% e grau de compactação de 90%.

Na amostra com 50% de RCC_{#30}, GC de 90% e umidade de 1% foi observada pequena expansão (0,5%), o que pode ser explicado devido ao ajuste dos grãos, se comprimindo, exercendo grande tensão e ao ser inundada havendo um rearranjo dessas partículas exercendo expansão. A umidade inicial e a tensão a que o solo está submetido têm importância significativa no comportamento de variação de volume quando as amostras são inundadas.

Os Potenciais de Colapso das amostras investigadas na pesquisa, para todos os níveis de tensões aplicadas, incluindo classificação segundo estão apresentados no Apêndice B. Destaca-se que os critérios de Jennings e Knight (1975) recomendam a seguinte classificação para o potencial de colapso (CP) dos solos: $0 < PC < 1$ (não apresenta problemas para obras de engenharia); $1 < PC < 5$ (problema moderado); $5 < PC < 10$ (problemático); $10 < PC < 20$ (problema grave); $PC > 20$ (problema muito grave).

Segundo o critério de Jennings e Knight (1975), o potencial de colapso do solo em estudo, sob todas as condições apresentam em sua maioria a condição de problema moderado; as demais misturas com o acréscimo do RCC_{#30} apresentam resultados em sua maior parte a condição de sem problema para o risco de colapsividade, obtendo melhores resultados nas condições impostas na mistura com 50% de RCC_{#30} + 50% de Solo, apresentando potencial de colapso máximo de 3,05% na tensão de 320kPa, com GC 85% e umidade de 4%.

Uma comparação dos valores calculados dos potenciais de colapso ou expansão (CP ou SP % = $(\Delta\varepsilon_v / (1 - \varepsilon_{v_{nat}})) \times 100$, onde $(\Delta\varepsilon_v = \varepsilon_{v_{nat}} - \varepsilon_{v_{inun}})$ obtidos dos ensaios edométricos simples e duplos e a comparação destes potenciais com a tensão vertical de consolidação das amostras estudadas estão apresentadas nas Tabelas 20 a 22.

Tabela 20 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade natural do solo ($w = 0,2\%$) e misturas ($w = 1\%$).

Potenciais de Colapso e Expansão (%)							
Nas Tensões Verticais de Inundação (kPa)							
Amostras		10		40		160	
		ES	ED	ES	ED	ES	ED
GC 85% w = 0,2 e 1%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	3,02	1,45	5,29	1,73	8,38	2,66
	Solo + 10% RCC#30	0,94	0,63	3,61	0,83	6,47	1,20
	Solo + 30% RCC#30	0,92	1,26	3,57	1,81	5,72	2,12
	Solo + 50% RCC#30	0,64	0,50	2,75	0,45	5,65	0,71
GC 90% w = 0,2 e 1%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	1,26	0,61	2,14	1,18	5,99	1,92
	Solo + 10% RCC	0,74	0,43	1,86	0,95	3,05	1,06
	Solo + 30% RCC	0,65	0,55	1,79	-0,53	2,92	-0,24
	Solo + 50% RCC	0,51	0,62	1,73	0,68	2,71	0,59
GC 95% w = 0,2 e 1%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	1,06	0,12	1,91	1,03	4,05	2,14
	Solo + 10% RCC	1,01	0,43	1,64	0,82	3,52	0,97
	Solo + 30% RCC	0,95	0,71	1,59	0,60	3,46	0,21
	Solo + 50% RCC	0,75	0,53	1,36	0,37	3,35	0,23

Tabela 21 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade de $w = 4\%$.

Potenciais de Colapso e Expansão (%)							
Nas Tensões Verticais de Inundação (kPa)							
Amostras		10		40		160	
		ES	ED	ES	ED	ES	ED
GC 85% w = 4%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	2,04	0,21	3,52	0,37	6,32	1,55
	Solo + 10% RCC#30	0,66	0,62	1,90	1,22	6,06	2,65
	Solo + 30% RCC#30	0,29	0,42	1,85	0,54	3,06	0,93
	Solo + 50% RCC#30	0,14	0,19	1,66	0,32	2,08	1,24
GC 90% w = 4%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	0,95	0,60	2,01	0,87	5,26	1,23
	Solo + 10% RCC	0,91	0,23	1,41	0,23	2,88	0,21
	Solo + 30% RCC	0,54	0,23	1,38	0,75	2,83	1,02
	Solo + 50% RCC	0,50	0,27	0,86	0,29	2,10	0,19
GC 95% w = 4%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	0,75	0,44	1,28	0,75	3,84	0,72
	Solo + 10% RCC	0,72	0,46	1,56	0,66	3,33	0,74
	Solo + 30% RCC	0,56	0,21	1,52	0,93	3,32	1,47
	Solo + 50% RCC	0,34	0,37	0,74	0,31	2,09	0,19

Tabela 22 - Potenciais de colapso, obtidos pelos ensaios edométricos simples (ES) e duplos (ED), das amostras estudadas, na umidade de $w = 7\%$.

Potenciais de Colapso e Expansão (%) Nas Tensões Verticais de Inundação (kPa)							
Amostras		10		40		160	
		ES	ED	ES	ED	ES	ED
GC 85% w = 7%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	1,35	1,65	3,33	1,98	6,13	1,93
	Solo + 10% RCC _{#30}	0,43	0,13	1,61	0,30	2,18	0,71
	Solo + 30% RCC _{#30}	0,35	0,74	1,60	0,49	2,14	0,35
	Solo + 50% RCC _{#30}	0,27	0,74	1,52	0,39	2,03	0,35
GC 90% w = 7%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	1,01	1,10	1,61	1,28	3,50	1,87
	Solo + 10% RCC	0,44	0,29	1,25	0,33	1,52	0,36
	Solo + 30% RCC	0,30	0,18	1,25	0,55	1,31	0,61
	Solo + 50% RCC	0,29	0,65	1,24	0,62	1,30	0,65
GC 95% w = 7%	Solo (VERÍSSIMO, 2015)	0,25	0,20	1,14	0,16	2,20	0,25
	Solo + 10% RCC	0,23	0,51	0,94	0,71	1,19	1,07
	Solo + 30% RCC	0,24	0,01	0,91	0,38	1,09	0,66
	Solo + 50% RCC	0,18	0,25	0,72	0,24	1,04	0,25

Observa-se que os valores dos Potenciais de Colapso das amostras estudadas obtidos nos ensaios edométricos duplos, assim como nos ensaios edométricos simples, também crescem com o acréscimo da tensão vertical de consolidação no solo e nas misturas, atingindo os valores máximos na tensão de 160kPa. As amostras de solo obtiveram os maiores valores em comparação as misturas com RCC_{#30}, e não apresentam comportamento de pico. Também há uma tendência à redução do Potencial de Colapso com o acréscimo do percentual de RCC_{#30} ao solo, com o acréscimo da umidade inicial e com o aumento do grau de compactação.

O colapso do solo nos ensaios edométricos duplos foram menores na maioria das tensões aplicadas. Na umidade inicial de 0,2% para o solo, alcançou valores mais elevados na tensão de 160kPa e GC de 85% em relação as outras umidades iniciais (4 e 7%). Para os GC de 90% e 95%, os maiores valores do potencial de colapso foram encontrados no solo, 1,87% e 2,14%, verificados após a inundação do solo, sob tensão de 160kPa, respectivamente.

Os ensaios edométricos duplos, segundo Aitchinson (1973) *apud* Mota (2006), podem ser influenciados por três limitações na sua estimativa de recalques. A primeira se refere à dependência do colapso à umidade inicial (sucção) do solo; a segunda diz que o processo de colapso pode depender do caminho de tensões; e a terceira, diz respeito ao mecanismo de colapso, que pode ser controlado por outro fator, além da sucção, tal como a interação química.

Observa-se que a maior parte dos resultados experimentais, indicam a superioridade nas deformações de colapso obtidas a partir dos ensaios edométricos simples. Os valores dos Potenciais de Colapso determinados nos ensaios edométricos duplos são cerca de 35% menores do que nos ensaios edométricos simples. Resultado semelhante foi encontrado por Ferreira (1995), que utilizou um solo colapsível de Petrolina-PE, com amostras indeformadas na umidade natural, onde encontrou valores superiores para os ensaios edométricos simples, e atribuiu as diferenças dos resultados encontrados ao estado tensional (caminho de tensões verticais; sucções iniciais; e índice de vazios). A partir dos resultados dos ensaios edométricos duplos, foram determinados os índices de compressão (C_c), o índice de expansão (C_s) do solo e das misturas solo-RCC_{#30}, apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Índice de Compressão e Expansão das amostras, nas diferentes condições estudadas.

Condições	Índices	Solo			10% de RCC _{#30}			30% de RCC _{#30}			50% de RCC _{#30}			
		GC 85%	GC 90%	GC 95%	GC 85%	GC 90%	GC 95%	GC 85%	GC 90%	GC 95%	GC 85%	GC 90%	GC 95%	
1%	Natural	C_c	0,086	0,033	0,023	0,037	0,051	0,031	0,065	0,050	0,037	0,058	0,042	0,041
		C_s	0,009	0,012	0,009	0,009	0,017	0,017	0,056	0,001	0,010	0,018	0,012	0,037
	Inundado	C_c	0,097	0,056	0,048	0,044	0,037	0,032	0,066	0,043	0,030	0,071	0,039	0,036
		C_s	0,028	0,015	0,015	0,013	0,028	0,015	0,014	0,009	0,007	0,017	0,016	0,017
4%	Natural	C_c	0,043	0,022	0,053	0,099	0,059	0,028	0,058	0,045	0,033	0,032	0,040	0,037
		C_s	0,012	0,009	0,011	0,012	0,003	0,012	0,010	0,012	0,012	0,016	0,016	0,012
	Inundado	C_c	0,120	0,042	0,042	0,106	0,064	0,032	0,059	0,053	0,043	0,047	0,038	0,033
		C_s	0,017	0,014	0,012	0,018	0,003	0,016	0,013	0,014	0,015	0,014	0,013	0,012
7%	Natural	C_c	0,091	0,025	0,040	0,025	0,048	0,027	0,054	0,035	0,027	0,029	0,037	0,031
		C_s	0,017	0,015	0,009	0,012	0,008	0,012	0,030	0,015	0,012	0,013	0,012	0,021
	Inundado	C_c	0,069	0,050	0,041	0,056	0,037	0,042	0,039	0,048	0,032	0,045	0,027	0,042
		C_s	0,012	0,013	0,011	0,012	0,027	0,009	0,013	0,023	0,017	0,014	0,012	0,018

Nota-se com os resultados que as compressibilidades do solo inundado e não inundado têm diferentes magnitudes. Observa-se que os parâmetros obtidos a partir dos ensaios na umidade natural foram geralmente inferiores aos obtidos a partir dos ensaios inundados. Para o grau de compactação de 85%, a compressibilidade na condição natural e inundado cresce com o acréscimo de RCC_{#30} até 30% e decresce posteriormente com o acréscimo do percentual até 50% de RCC_{#30}. Para GC de 90% e 95% decresce com o acréscimo do RCC_{#30}. Com o aumento da umidade, há redução do índice de compressão para o solo e mistura com 10% de RCC_{#30} até a umidade de 4%, havendo um pequeno aumento na umidade de 7%. Para as amostras com 30% e 50% de RCC_{#30} houve uma redução da compressibilidade na condição natural e inundado com o acréscimo com o acréscimo de umidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões dos resultados encontrados nos ensaios realizados no programa experimental. Em seguida, são recomendadas algumas ações de aprimoramento da pesquisa realizada.

5.1 Conclusões

A análise granulométrica do solo de Petrolina-PE, indica um solo muito uniforme e mal graduado, constituído predominantemente por areia, sendo: 1 % de areia grossa; 40% de areia média; 49% de areia fina; 3% de silte; e 7% de argila. O solo é não líquido e não plástico, se enquadrando no grupo SP-SM na classificação do SUCS e A-2-5 na classificação TRB. O valor do peso específico aparente seco máximo, obtido na energia do Proctor Normal, é de 18,50 kN/m³, na umidade ótima de 7,30% (TORRES, 2014).

A composição gravimétrica do resíduo estudado mostrou que 99,68% dos constituintes presentes pertencem a materiais classificados como Classe A da Resolução CONAMA n° 307 de 2002. A parcela composta por materiais contaminantes (madeira, plástico, metal e papel) constitui uma parcela menor que 1% do RCC, atendendo ao critério especificado pela norma NBR 15115 (ABNT, 2004), cujo valor deve ser inferior a 3%. Ainda, na composição gravimétrica do RCC, observou-se que o principal constituinte foi o material cinza e o proveniente de tijolos, o que demonstra ser um material misto.

A granulometria do RCC_{#30} mostrou que ele é constituído por uma maior parcela de areia grossa 56% e areia média 43%, sendo mal graduado e com ausência de silte e argila. O resíduo se enquadra na classificação SUCS e TRB como SP (areia mal graduada) e A-1-a. Por se tratar de um material granular, não possuiu limites de consistência.

As curvas granulométricas indicaram comportamento uniforme e que nas misturas solo-RCC_{#30}, o principal constituinte é a parcela equivalente a areia onde foi observado o aumento das frações de areia grossa e média com o aumento do percentual de RCC_{#30} ao solo. As frações de silte e argila das misturas se mantiveram quase que inalteradas. A amostra da mistura 50% RCC_{#30} + Solo 50% apresentou distribuição das partículas bem graduada, as demais mal

graduadas. As misturas foram classificadas como SP (areia mal graduada) e A-3 para as misturas solo-RCC_{#30} com 10% e 30% de RCC_{#30}. Para a mistura 50% RCC_{#30} + 50% de solo a classificação foi SW (areia bem graduada) e A-1-b. Este aspecto foi reforçado pela ausência de LL e LP em todas as amostras, típico de materiais arenosos. A adição de RCC_{#30} ao solo de Petrolina melhorou suas características para uso em subleito de pavimentos, o solo passa de A-2-5 para A-1-b.

Nos resultados de densidade real observa-se que o acréscimo das frações de RCC_{#30} ao solo causou um decréscimo na densidade real das misturas, mantendo-se entre os valores do solo (2,638) e resíduo (2,604). Apesar de variarem pouco em relação ao solo, estes valores ficam próximo ao encontrados em outros estudos.

O RCC_{#30} apresentou maior umidade ótima (19,72%), devido ao mesmo possuir elevado percentual de partículas de tijolos, mais poroso. O acréscimo de RCC_{#30} ao solo de Petrolina apresentou um aumento proporcional dos valores da umidade ótima e reduziu os valores do peso específico aparente seco máximo das misturas. Os valores do peso específico seco máximo das misturas foram maiores que a do RCC_{#30} e menores que o solo, situando-se entre os valores das duas amostras.

A compactação teve influência significativa na granulometria da mistura com 50% de RCC_{#30} e na amostra de RCC_{#30}, onde a deixou a amostra RCC_{#30} depois da compactação bem graduada. Nas demais amostras solo-RCC_{#30} não houve alterações expressivas.

A metodologia utilizada para a moldagem das amostras dos ensaios edométricos (controle de umidade, molde de compactação, controle dos pesos dos corpos de prova e técnica de compactação estática) resultou em corpos de prova com baixa variabilidade das condições esperadas, apresentando índices físicos com pequena variação de valores em relação aos desejados.

O colapso do solo, atingiu maior resultado no edométrico simples na umidade natural (0,2%), alcançando um valor máximo de 8,38% na tensão de 160 kPa e grau de compactação de 85%. Para as misturas com 10% de RCC_{#30} atinge valor máximo de 6,47% em 160 kPa, na umidade de 1%. Enquanto que o potencial de colapso das misturas com 30% de RCC_{#30} e 50% de RCC_{#30}, os maiores valores de potencial de colapso foram de 5,72% e 5,65%, verificados após a inundação do ensaio, sob tensão de 160kPa, respectivamente, nas mesmas condições com 1%.

As amostras não apresentam um comportamento de pico, ou seja, não existe uma tensão crítica para um colapso máximo. As misturas na umidade de 7% e grau de compactação de 95% apresentaram menores variação de colapsibilidade em relação ao solo.

As deformações volumétricas foram menores para as amostras com acréscimo de RCC_{#30}. As demais deformações se apresentaram sempre menores em relação ao solo. Os potenciais de colapso medidos por meio dos ensaios edométricos duplos foram menores aos obtidos a partir dos edométricos simples. Os valores dos potenciais de colapso determinados através de ensaios edométricos simples são na maioria superiores aos obtidos pelos ensaios edométricos duplos.

Nos ensaios edométricos simples e duplos, os valores dos potenciais de colapso crescem, com o acréscimo de tensão e não existe uma tensão crítica para um colapso máximo no solo e misturas, havendo uma tendência à redução da taxa de crescimento com o acréscimo do percentual de RCC_{#30} ao solo, com o aumento da umidade inicial e com o aumento do grau de compactação.

Os resultados indicam ainda que os potenciais de colapso são pequenos para tensões inferiores. Mesmo as amostras com umidade próxima a umidade ótima do solo (7,3%) apresentaram colapsibilidade, demonstrando que o solo estudado se apresentando como verdadeiramente colapsível. A compactação das amostras próximo a condição ótima do solo reduz o índice de vazios inicial, aumenta o grau de saturação, a umidade, a resistência e confere ao solo uma estrutura mais estável quando inundado para todas as misturas.

O acréscimo de RCC_{#30} influenciou diretamente na redução da compressibilidade do solo, onde, as taxas de compressão são menores com o acréscimo do Grau de Compactação e umidade. A inundação provoca um aumento da compressibilidade das amostras.

Concluiu-se com base nos resultados apresentados, que a adição do RCC_{#30} funciona, com eficiência, na redução do colapso do solo de Petrolina; a elevação do grau de compactação e aumento da umidade traz melhora significativa ao solo, reduzindo de maneira expressiva seu Potencial de Colapso, tornando-se uma alternativa promissora para a destinação do RCC em municípios onde se tenham áreas com esse tipo de solo e unidades de processamento de RCC.

5.2 Recomendações

Algumas sugestões são apresentadas para dar continuidade ao tema desta pesquisa:

- Analisar o comportamento mecânico do solo e misturas do solo/RCC, mediante às solicitações de cargas, e analisar o comportamento de colapso em condições normais e sob inundação em campo em ensaios de placa, um sobre o solo natural e outro sobre camadas compactada de solo-RCC.

- Analisar a influência da interação solo/RCC em maiores tensões verticais de consolidação.

- Realização de um estudo similar ao desta pesquisa em outro campo experimental, com uso de outros resíduos.

REFERÊNCIAS

AGNELLI, N.; ALBIERO, J. H. Aspectos físicos, químicos e mecânicos de um solo colapsível, inundado com diferentes líquidos. **Revista Brasileira de Geotecnia: Solos e Rochas**, ago/1997, v. 20, n. 2, p.79-95, 1997.

AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. 27.p. 1ª edição, Editora Blucher, São Paulo, Brasil. 2011.

AITCHISON, G.D. “**Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansible and Others)**”. In: VIII Inter. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, vol.3, pp. 161-189. 1973.

AMADEI, D.I.B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de engenharia civil, Programa de pós-graduação em engenharia urbana– Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

AMORIM, S. F. **Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2004.

ARAGÃO, C. J. G. e MELO, A. C. Fundações Rasas em Solos Colapsíveis no Semiárido em Pernambuco. VII COBRAMSEF. **Anais...** Olinda-PE, Vol.2, p. 19-40, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – **ABRELPE** : Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013. São Paulo. 114 f. 2014. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/bhome2013/arquivo/noticias_eventos/Panorama2013.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15.115**: Procedimentos para execução de pavimentação utilizando agregados reciclados de resíduos da construção. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15.116**: Requisitos para a utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural com agregados reciclados de resíduos da construção. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6.457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 19p. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6.459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. 6p. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6.508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 8p. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7.182**: Solo – Ensaio de compactação. 10p. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007** – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.007**: Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.180**. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-**NBR 7.181**: Solo – Análise Granulométrica. 13p. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO - ABRECON. Universidade Federal do Paraná - Prof. Dr. Leonardo F. R. Miranda (Org.). **Pesquisa Setorial da Reciclagem de Resíduos de Construção**. Brasil: UFPR, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO – ABRECON (2015). Disponível em: <<http://www.abrecon.org.br/Noticias/131/gest%c3%a3o-de-res%c3%adduos-garante-benef%c3%adcios-na-constru%c3%a7%c3%a3o-civil.aspx>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

AYADAT T. e HANNA A. Design of Foundations Built on a Shallow Depth (Less than 4 m) of Egyptian Macro-Porous Collapsible Soils. **Open Journal of Geology**, Vol. 3 No. 3, pp. 209-215. 2013.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, Á. G. Quantificação e classificação de resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído**. Porto Alegre. v. 8. n° 3. p 65- 73. jul./out. 2008. INSS 1678-8621. 2008.

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

_____. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 12 dez. 2013.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Programa Nacional de Educação Ambiental. **Sistema Brasileiro sobre Educação Ambiental e Práticas Sustentáveis**. Brasília: 2013. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/sdi/ea/index.cfm>>. Acesso em 1 jul. 2013.

_____. **Portal Brasileiro de Dados Abertos**. Unidades entregues - MCMV. Disponível em <http://api.pgi.gov.br/api/1/serie/2495.html> >. Acesso em 11 de outubro de 2015.

BRASILEIRO, L. **Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural do Concreto Asfáltico**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina. 2013.

BRUNTLAND, G. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. Oxford University Press, Oxford, 1987.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. United States Department of the Interior, 1960-1974.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – **CBIC** (2013). Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/sala-de-imprensa/noticia/emprego-na-construcao-civil-cresce-3-no-pais-em-2012>>. Acesso em: 09 set. 2014.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2005.

CHEN, F. H. Foundations on Expansive Soil”. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. **Developments in Geotechnical Engineering**, nº 12. 1975.

CHEN, M., LIN, J., WU, S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, 25, 3909–3914. 2011.

CHEN, Z.; LI, H.; WONG, C. T. C. An application of bar code system for reducing construction wastes. **Automation in Construction**. n. 11, p, 521 – 533, 2002.

CLEMENCE, S. P e FINBARR, A. O. Design Considerations for Collapsible Soils. ASCE. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, GT3, pp. 303-317. 1981.

COSTA, U.; URSELLA, P. Construction and demolition waste recycling in Italy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNICAL IMPLICATIONS OF CONSTRUCTION WITH ALTERNATIVE MATERIALS – WASCON, 5., San Sebastian. **Anais...** San Sebastian: Inasmet, 2003. p.231-239. 2003.

CUNHA, G. N. M.; MICELI, V. M. **Análise da viabilidade econômica de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil a partir de sistemas dinâmicos**. Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro/RJ. 2013.

DINIZ, H. N.; SANTORO, J. A ocorrência de solos colapsíveis no bairro Imaculada, em Taubaté, SP: um estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 14-28 . (CD-ROM), 2004.

DUDLEY, J. H. Review of Collapsing Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. ASCE, vol. 96, nº SM3, Maio, pp. 925-947. 1970.

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL de 19 de novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga algumas diretivas (**Diretiva 2008/98/CE**), L312. p. 3-29. 2008.

EUROSTAT, Environment and Energy, 2009. **Generation and treatment of waste.** Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/>>. Acessado em 25 de Janeiro de 2014.

FALCÃO, R. **Construção civil também faz reciclagem.** Diário de Pernambuco. Recife. 10 ago. 2014. Economia – ganhos. Web. Disponível em <http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/economia/2014/08/10/internas_economia,521514/construcao-civil-tambem-faz-reciclagem.shtml> 2014.

FARIAS, A.B. **Análise técnica e econômica de resíduos de construção e demolição aplicados em pavimentação.** Recife: UPE, 2013. 183 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2013.

FAURE, A. **Comportamento mecânico das argilas em função de sua natureza: formulação de uma nova concepção de plasticidade e liquidez.** IV Reunião Aberta da Indústria da cal. Boletim no 12, 100-123. 1980.

FEITOSA, M. C. A. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação de Pós-graduação. Mestrado em Engenharia Civil. 120 p., 2009.

FEITOSA, M. C. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; FERREIRA, S. R. M. Melhoramento de um Solo Colapsível através da utilização de Lodo de Esgoto. **Symposium** (Recife), v. 14, p. 9, 2010.

FERREIRA, M. C., THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 18, p.1-12, nov. 2011.

FERREIRA, M.C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 18, p.1-12, nov. 2011.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devidos à Inundação.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil). 1995.

FERREIRA, S. R. M. Formas da Curva de Compactação em Solos Expansivos e Colapsíveis. **Anais... COBRAMSEG 2012.** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas – PE. pg. 7. CD ROM. 2012.

FERREIRA, S. R. M. Microestrutura de solos colapsíveis e técnicas de melhoramento. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Gramado.

Anais... XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo: ABMS. v. 1. p. 1-8. 2010.

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 2008, Salvador. **Anais...** VI Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados. Salvador: EDUFBA, v. 2. p. 593-619. 2008.

FERREIRA, S.R.M.; AMORIM, S.F.; VAREJÃO-SILVA, M.A. Tecnologia da Geoinformação Aplicada aos Estudos de Solos Expansivos e Colapsíveis do estado de Pernambuco. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2, 2008, Recife. **Annals...** Recife: Simgeo, 2008.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneu como material alternativo.** 2007. 202 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FONSECA, E. C. A. da. **Análise numérica do comportamento de muros reforçados com geossintéticos construídos com material de aterro não convencional.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília: UNB, 93p. 2012.

FRANÇA, E. A. *et al.* Blocos de concreto produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição – RCD: Processo de produção. In: Jornada de pesquisa e extensão - IFMT, **Anais...** Cuiabá-MT, 2013.

FUCALE, S. P. **Comportamento de Variação de Volume devido à Inundação em Alguns Solos Colapsíveis do Estado de Pernambuco.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Deptº. de Engenharia Civil, Recife. 2000.

FUJII, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias.** Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

GIBBS, H. J. e BARA, J. P. Stability Problems of Collapsing Soil. **Journal of the Soil Mech. and Found. Div.**, vol. 93, Nº 4, pp. 557-594. 1967.

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

GUIMARÃES NETO, J. S. F. Análise de alguns fatores que influenciam a colapsibilidade de um solo compactado devido à inundação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Civil Recife, p. 107, 2007.

GUIMARÃES NETO, J. S. F. E, FERREIRA, S.R.M. Colapso devido à inundação em solos compactados. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos de Engenharia Geotécnica. 15. 1998. **Anais...** Brasília-DF, v. 1, pp 165-170. 1998.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 140 p. 2008.

HARTMANN, F.; SAMBERG, J. R. D. A variável ambiental na conservação rodoviária. In: ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 8º, 2003, Gramado. Minicurso. Artigos Meio Ambiente. p.75-80. **Anais...** Gramado. CD-ROM. 2003.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. **Cidades@**. 2015. Disponível em <http://cod.ibge.gov.br/234Z3> > acesso em 11 de outubro de 2015.

JI CHEN, H.; YEN, T.; HUNG CHEN, K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete**. V 33. 125-132p. 2003.

JIMÉNEZ R.J.; AYUSO J.; GALVÍN A.P.; LÓPEZ M.; AGRELA F. Use of mixed recycled aggregates with a lowem bodied energy from non-selected CDW in um paved rural roads. **Construction and Building Materials**. n. 34, p. 34-43, mar. 2012.

KARPINSK, L.A.; PANDOLFO, A.; REINEHR, R.; KUREK, J.; PANDOLFO, L.; GUIMARÃES, J. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**, Porto Alegre, Edipucrs, 2009.

KIM, S; LEE, D.; LEE, J.; YOU, S.; CHOI, H. Application of recycled aggregate porous concrete pile (RAPP) to improve soft ground. **Journal of Material Cycle sand Waste Management**, v.14, n.4, p.360-370, 2012.

LEE, P. W.; SUEDEKAMP, R. J. Characteristics of . Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils. **Highway Research Record**, n. 381, National Academy of Sciences, Washington, D.C., p 1-9. 1972.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da Construção Civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 216p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** [online]. vol.5, n.2, pp. 166-181. 2012.

LIRA JR., E. A. de. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos.** Recife. UPE. 166f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife. 2010.

LOBO, A. S.; FERREIRA, C. V.; RENOFIO, A. Muros de arrimo em solos colapsíveis provenientes do arenito Bauru: problemas executivos e influência em edificações vizinhas em áreas urbanas. **Acta Scientiarum (UEM)**, Maringá, v. 25, n.2, p. 169-177, 2003.

MACCARINI, M. E SANTOS, G. T. Ponto crítico de sensibilidade à compactação de solos residuais. **Anais...** Seminário Sobre Solos não Saturados, Brasília, pp 137-146. 1991.

MACCARINI, M., TEIXEIRA, V.H., SANTOS, G.T. E FERREIRA, R.S. Sedimentos quaternários do litoral de Santa Catarina: características geológicas e geotécnicas. **Anais...** Proc Sidequa, Simp. sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Brasileiras. Rio de Janeiro, vol. 2, p. 362-393. 1988.

MACEDO, T. F. **Análise do desempenho mecânico da mistura agregado reciclado-solo-fibra-cimento para pavimentação.** Recife: UPE, 162 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. 2013.

MACEDO, T. F. **Avaliação do uso de resíduos da construção e demolição com solo reforçado.** 84f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil - Universidade de Pernambuco. Recife. 2008.

MAHLER, C.F. **Análise de obras em solos colapsíveis e expansivos.** 1994. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 1994.

MÁLIA, M. A. B. **Indicadores de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

MÁLIA, M.; DE BRITO, J.; PINHEIRO, M. D.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 3, p.241-255, 2013.

MERINO, M. D. R.; GRACIA, P. I.; AZEVEDO, I. S. W. Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. **Waste Management & Research**, v. 28, n. 2, p.118-129, 2010.

MESQUITA, A.S.G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. **Revista Holos**, v.2, p.58-65, 2012.

MILLS-BEALE, J., YOU, Z. The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, 24, 230–235. 2010.

MIRANDA, L.F.R., ÂNGULO, S.C., CARELI, E. D. A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986 – 2008. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre. v.9, n.1, p.57–71. jan/mar. 2009.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma: gestão sustentável**. Uberlândia: UFU. 201f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. 2006.

MOTTA, E. Q. **Análise do Colapso de um Solo Compactado Devido à Inundação e à Interação Solo-Líquido Contaminante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Civil, Recife, p. 114, 2006.

MUELLER, A. **Closed Loop of Concrete Rubble? Bauhaus Universitat Weimar**. [notas de aula]. 2007. Disponível em: <www.uniweimar.de/Bauing/aufber/Lehre/Gastvorlesung/Barcelona/Lecture07.pdf>. Acesso em 15 set. 2013.

NAGALLI, A. The sustainability of brazilian construction and demolition waste management system. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 18. Pp 1755-1759. 2013.

NUNES, W. C. **Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido**. Goiânia: UFG. 200p. (Dissertação mestrado). Escola de engenharia civil da universidade federal de Goiás. 2007.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental Performance of Construction Waste: comparing threes cenarios from a case study in Catalonia, Spain. **Journal of Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 646-654, 2010.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; DIAS, A. J. G.; CORTES, P. L. Aspectos normativos a respeito de resíduos de construção civil: uma pesquisa exploratória da situação no Brasil e em Portugal. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 29, p. 155-169, abr. 2014.

PAULA, P. R. F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação de Pós-graduação. Mestrado em Engenharia Civil, 110 p., 2010.

PAZ, D. H. F.; SANTOS NETO, F. C.; LAFAYETTE, K. P. V.; FUCALE, S. F. Estimativa da geração atual de resíduos da construção e demolição (RCD) em municípios brasileiros. In: XV Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2013, São Paulo/SP. **Anais... do XV ENGEMA**, 2013.

PAZ, D. H. F.; SANTOS NETO, F. C.; LAFAYETTE, K. P. V.; MALAFAYA, F. 'Analysis of sustainability indicators on the management construction sites CDW in Recife, Brasil'. **Bund. F. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 1377-1389, 2014.

PERNAMBUCO. **Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)**. Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Recife, 2012.

PETROLINA, PREFEITURA MUNICIPAL. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades@**. 2015. Disponível em <http://www.petrolina.pe.gov.br/2010/cidade/Petrolina.html> >. Acesso em 11 de outubro de 2015.

PETROLINA, PREFEITURA MUNICIPAL. **Plano de Trabalho Reciclagem de Resíduos Sólido da Construção Civil. Secretaria de Serviços Públicos**. Disponível em http://www.petrolina.pe.gov.br/2010/noticia_2.php?id=4118>. Acesso em 11 de outubro de 2010.

PINHEIRO, S. M. M. **Resíduos Sólidos na Construção Civil**: Palestra Proferida na ASSEA – Associação dos Engenheiros, Arquitetos e Agrônomos do Vale do São Francisco em 14/02/2006. 2006.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PROCTOR, R.R. Design and Construction of Rolled Earth Dams. **Engineering News Record**, v.3, p 245-248, 286-289, 348-351, 372-376. 1933.

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação.** Recife:UPE, 2012. 120f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2012.

RECIFE. **Decreto nº 18.082, 13 de novembro de 1998:** Regulamenta a Lei nº 16.377/98 no que tange ao transporte e disposição de resíduos de construção civil e outros resíduos não abrangidos pela coleta regular e dá outras providências. Recife, 1998.

RECIFE. **Lei nº 16.377, de 15 de janeiro de 1998:** Introduce modificações na Lei 14.903 de 03 de outubro de 1986, e dá outras providências. Recife, 1998.

RECIFE. **Lei nº 17.072, de 04 de janeiro de 2005:** Estabelece as diretrizes e critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Recife, 2005.

REGINATTO, A. R. e FERRERO, J. C. Collapse Potential of Soils and Soil-Water Chemistry. Proceedings. **Annals...VIII Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.**, Moscow, vol.2.2, pp. 177-183. 1973.

RODRIGUES, C. R. S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil.** Recife: UPE, 2011. 118p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2011.

RODRIGUES, R. A.; VILAR, O. M. Colapso de solo desencadeado pela elevação do nível d'água. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 01, n. 06, pp. 13-27. 2013.

SÁEZ, P. V.; MERINO, M. D. R.; PORRAS-AMORES, C. Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 2, p.137-146, 2012.

SAMPAIO, L.L. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos.** Recife: UNICAP, 2013. 100p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Recife.2013.

SANTOS, A. N. dos, **Diagnóstico da Situação dos Resíduos de construção e Demolição (RCD) no Município de Petrolina (PE).** 2008. 111p. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, 2008.

SANTOS, E. C. G dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. 169f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2007.

SILVA, A. S.; BARBOSA, D. S.; SACRAMENTO, I. G.; JESUS, T. J. M.; FILHO, M. D. M. **Gestão dos resíduos sólidos gerado pelo setor da construção civil (construtoras) em Aracaju.** Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas Unit. Aracaju, v. 2, n.1, p. 137-144, Março. 2014.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA, M. J. R. **Comportamento Geomecânico de Solos Colapsíveis e Expansivos em Petrolina e Cartas de Suscetibilidade.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, pg.110. 2003.

SILVA, V. C. DA. **Estudo da aplicação de resíduos da construção e demolição da universidade federal de campina grande em pavimentos.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba, 2012.

SIMAS, L. P., VALENÇA, P. M. A., FERREIRA, R. P., FROTA, C. A. Uso de passivos ambientais para a pavimentação de vias urbanas em Manaus, AM. **Ciência & Engenharia: (Science & Engineering Journal)**, v. 1, n. 22, p.13-20, jan. – jun. 2013.

TAM, V. W. Y.; GAO X. F.; TAM, C. M.; NG, K. M. Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. **Journal of Hazardous Materials.** v. 163, p. 823–828, 2009.

THE ROYAL SOCIETY. **Knowledge, Networks and Nations: Global scientific collaboration in the 21st century.** 2011. Disponível em: <http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2011/4294976134.pdf>. Acesso em 09 jul 2013.

TORRES, M. S. **Avaliação da colapsibilidade e da resistência de ponta de um solo de Petrolina devido à inundação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Civil Recife, p. 99, 2014.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2011.

VENDRUSCOLO, M. A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

VERISSÍMO, K. J. da S. **Análise de variação de volume e da resistência de ponta devido à inundação de um solo compactado de Petrolina-PE**. 2015. Dissertação (mestrado), Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco (a ser defendida), Recife –PE. 2015.

VIACELLI, L. **Estudo da viabilidade da utilização do agregado miúdo britado em concreto convencional**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

VICTOR, D. F.; VERAS, L. M. **Características de solos colapsíveis e expansíveis e locais de ocorrências**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Civil Recife. 2010. Disponível em: <<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Caracter%C3%ADsticas-De-Solos-colapsiveis-e-Expansiveis/59887983.html>>. Acesso em 12 mar 2013.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D. Contribuição ao Estudo e Análise de Variabilidade da Utilização de Concretos como Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição, In: Anais do II Seminário de Patologia das Edificações: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes. **Anais...** Porto Alegre. 2004.

VILLAR, O. M.; RODRIGUES, J. E.; NOGUEIRA, J. B. Solos colapsíveis: um problema para a engenharia de solos tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/CNPQ/ABMS, 1981, v. 1, p.209-224. 1981.

YUAN, H. Key indicators for assessing the effective nessof waste management in construction projects. **Ecological Indicators**, vol. 24, p. 476-484. 2013.

ZEGA, C.J.; MAIO, A. A. Di. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**, n. 31, p.2336-2340, 2011.

ZHU, J., WU, S., WANG, J. Z. D. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. **Construction and Building Materials**, n. 29,p. 466-475. 2012.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.**1997. 140f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1997.

ZORDAN, S. E. Entulho da indústria da construção civil. Disponível em: <<http://www.recycle.pcc.usp.br/fichatécnica.htm>>. 2007. Acesso em dez. de 2011.

APÊNDICE A

Condições iniciais e finais dos ensaios edométricos simples e duplos

Quadro 5 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 85%.

SOLO GC = 85% W = 0,2%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	0,22	0,675	0,671	0,995	0,86	15,71	15,75	23,60	0,621	100	15,37	19,00	3,02
40	0,22	0,681	0,636	0,934	0,85	15,66	15,69	20,88	0,549	100	15,58	18,83	5,29
160	0,22	0,680	0,574	0,843	0,85	15,66	15,70	16,79	0,442	100	15,38	17,95	8,38
Duplo Natural	0,22	0,690	-	-	0,84	15,58	15,61	0,22	0,592	0,98	15,58	15,61	-
Duplo Inundado	0,22	0,688	-	-	0,84	15,59	15,63	21,23	0,559	100	16,17	19,58	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,16	0,683	0,677	0,991	4,48	15,64	15,82	25,19	0,661	100	19,08	23,89	0,94
40	1,16	0,683	0,641	0,938	4,49	15,64	15,82	22,11	0,582	100	20,09	24,53	3,61
160	1,16	0,684	0,591	0,864	4,48	15,63	15,81	18,64	0,488	100	16,04	19,02	6,47
Duplo Natural	1,16	0,684	-	-	4,48	15,63	15,81	1,16	0,639	4,80	18,68	18,90	-
Duplo Inundado	1,16	0,684	-	-	4,48	15,63	15,81	23,39	0,614	100	19,36	23,89	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,15	0,685	0,674	0,985	4,40	15,59	15,77	25,13	0,659	100	16,55	20,71	0,92
40	1,15	0,687	0,632	0,920	4,38	15,57	15,75	21,85	0,574	100	19,95	24,31	3,57
160	1,15	0,686	0,503	0,733	4,39	15,58	15,76	15,91	0,417	100	16,09	18,65	5,72
Duplo Natural	1,15	0,685	-	-	4,40	15,59	15,77	1,15	0,588	5,12	15,59	15,77	-
Duplo Inundado	1,15	0,686	-	-	4,39	15,58	15,76	21,52	0,564	100	17,23	20,94	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,19	0,725	0,717	0,988	4,31	15,20	15,38	26,95	0,706	100	15,33	19,46	0,64
40	1,19	0,724	0,676	0,933	4,32	15,20	15,39	24,04	0,630	100	15,22	18,88	2,75
160	1,19	0,726	0,567	0,781	4,31	15,19	15,38	18,25	0,478	100	20,09	23,75	5,65
Duplo Natural	1,19	0,727	-	-	4,30	15,18	15,36	1,19	0,651	4,81	15,18	15,36	-
Duplo Inundado	1,19	0,727	-	-	4,30	15,18	15,36	24,02	0,628	100	15,00	18,60	-

Quadro 6 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 90%.

SOLO GC = 90% W = 0,2%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	0,22	0,600	0,595	0,992	0,96	16,45	16,49	21,62	0,575	100	16,38	19,88	1,264
40	0,22	0,591	0,563	0,952	0,98	16,54	16,58	19,97	0,530	100	16,56	19,84	2,138
160	0,22	0,585	0,484	0,827	0,99	16,60	16,64	15,05	0,395	100	16,59	19,08	5,992
Duplo Natural	0,22	0,590	-	-	0,98	16,56	16,59	0,22	0,540	1,07	16,56	16,59	-
Duplo Inundado	0,22	0,585	-	-	0,99	16,60	16,64	19,37	0,510	100	18,27	21,81	-
10% RCC _{#30} + 90% SOLO GC = 90% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	0,80	0,603	0,595	0,986	3,47	16,42	16,55	22,18	0,583	100	18,40	22,47	0,74
40	0,80	0,603	0,560	0,929	3,47	16,42	16,55	20,18	0,531	100	17,27	20,74	1,86
160	0,80	0,602	0,512	0,850	3,47	16,43	16,56	17,73	0,466	100	18,66	21,97	3,05
Duplo Natural	0,80	0,604	-	-	3,46	16,41	16,54	0,80	0,563	3,71	16,41	16,54	-
Duplo Inundado	0,80	0,604	-	-	3,47	16,41	16,54	21,20	0,550	100	21,07	25,55	-
30% RCC _{#30} + 90% SOLO GC = 90% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,15	0,607	0,600	0,989	4,96	16,35	16,53	22,47	0,590	100	16,00	19,60	0,65
40	1,15	0,607	0,558	0,920	4,96	16,34	16,53	20,24	0,530	100	18,21	21,90	1,79
160	1,15	0,607	0,501	0,824	4,96	16,34	16,53	17,41	0,457	100	21,49	25,23	2,92
Duplo Natural	1,15	0,606	-	-	4,97	16,36	16,54	1,15	0,526	5,73	16,36	16,54	-
Duplo Inundado	1,15	0,607	-	-	4,96	16,34	16,53	20,51	0,537	100	16,41	19,77	-
50% RCC _{#30} + 90% SOLO GC = 90% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,19	0,631	0,623	0,989	4,96	16,08	16,27	23,54	0,615	100	16,61	20,52	0,51
40	1,19	0,631	0,585	0,927	4,96	16,07	16,27	21,37	0,558	100	16,92	20,54	1,73
160	1,19	0,632	0,528	0,835	4,95	16,06	16,25	18,69	0,486	100	20,68	24,55	2,71
Duplo Natural	1,19	0,631	-	-	4,96	16,07	16,27	1,19	0,590	5,30	16,07	16,27	-
Duplo Inundado	1,19	0,632	-	-	4,95	16,07	16,26	22,03	0,577	100	16,80	20,50	-

Quadro 7 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 0,2 e 1% e Grau de Compactação de 95%.

SOLO GC = 95% W = 0,2%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	0,22	0,498	0,488	0,981	1,16	17,57	17,61	17,95	0,472	100	17,57	20,72	1,06
40	0,22	0,501	0,474	0,947	1,15	17,54	17,57	16,95	0,446	100	17,51	20,48	1,91
160	0,22	0,481	0,411	0,855	1,20	17,78	17,81	13,45	0,354	100	17,75	20,13	4,05
Duplo Natural	0,22	0,489	-	-	1,18	17,67	17,71	0,22	0,468	1,23	17,67	17,71	-
Duplo Inundado	0,22	0,486	-	-	1,19	17,72	17,76	16,09	0,423	100	17,61	20,44	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	0,80	0,504	0,493	0,980	4,16	17,51	17,64	18,32	0,478	100	19,31	22,85	1,01
40	0,80	0,504	0,464	0,921	4,16	17,51	17,64	16,75	0,440	100	19,57	22,85	1,64
160	0,80	0,503	0,397	0,790	4,16	17,51	17,65	13,24	0,348	100	18,52	20,98	3,52
Duplo Natural	0,80	0,505	-	-	4,14	17,48	17,62	0,80	0,475	4,41	17,48	17,62	-
Duplo Inundado	0,80	0,504	-	-	4,15	17,50	17,63	17,22	0,453	100	18,98	22,26	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	4,56	0,512	0,505	0,987	23,48	17,41	18,21	18,89	0,50	100	22,34	26,56	0,56
40	4,56	0,512	0,476	0,931	23,48	17,41	18,21	17,30	0,45	100	22,72	26,65	1,52
160	4,56	0,512	0,394	0,769	23,46	17,41	18,20	13,24	0,35	100	23,40	26,49	3,32
Duplo Natural	4,56	0,512	-	-	23,48	17,41	18,21	4,56	0,48	24,96	17,41	18,21	-
Duplo Inundado	4,56	0,512	-	-	23,46	17,41	18,20	17,46	0,46	100	22,58	26,51	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 1%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	%
10	1,19	0,546	0,536	0,982	5,73	16,96	17,16	20,10	0,525	100	17,53	21,06	0,75
40	1,19	0,546	0,505	0,926	5,73	16,96	17,16	18,53	0,485	100	17,19	20,38	1,36
160	1,19	0,545	0,412	0,757	5,74	16,98	17,18	13,94	0,365	100	21,54	24,55	3,35
Duplo Natural	1,19	0,546	-	-	5,73	16,96	17,16	1,19	0,499	6,27	16,96	17,16	-
Duplo Inundado	1,19	0,546	-	-	5,73	16,96	17,17	18,86	0,493	100	17,02	20,23	-

Quadro 8 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 85%.

SOLO GC = 85% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,46	0,670	0,656	0,978	17,51	15,76	16,46	23,63	0,62	100	15,59	19,27	2,04
40	4,46	0,672	0,649	0,966	17,45	15,74	16,44	22,42	0,59	100	15,43	18,88	3,52
160	4,46	0,667	0,580	0,870	17,61	15,79	16,50	18,24	0,48	100	15,73	18,60	6,32
Duplo Natural	4,46	0,685	-	-	17,13	15,62	16,32	4,46	0,64	18,34	15,59	16,28	-
Duplo Inundado	4,46	0,668	-	-	17,58	15,78	16,49	21,43	0,56	100	15,77	19,14	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,58	0,664	0,656	0,987	18,16	15,81	16,54	24,61	0,65	100	20,19	25,16	0,66
40	4,58	0,664	0,616	0,928	18,18	15,82	16,55	22,28	0,59	100	20,27	24,78	1,90
160	4,58	0,664	0,513	0,773	18,18	15,82	16,55	16,03	0,42	100	21,05	24,42	6,06
Duplo Natural	4,58	0,664	-	-	18,16	15,81	16,54	4,58	0,55	22,07	23,40	24,48	-
Duplo Inundado	4,58	0,664	-	-	18,18	15,82	16,55	20,09	0,52	100	20,67	24,82	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,56	0,689	0,685	0,994	17,44	15,58	16,30	25,91	0,68	100	19,87	25,01	0,29
40	4,56	0,689	0,642	0,932	17,43	15,58	16,29	23,30	0,61	100	15,78	19,45	1,85
160	4,56	0,689	0,607	0,882	17,44	15,59	16,30	21,26	0,56	100	20,24	24,55	3,06
Duplo Natural	4,56	0,687	-	-	17,47	15,60	16,31	4,56	0,60	19,93	23,53	24,60	-
Duplo Inundado	4,56	0,687	-	-	17,49	15,60	16,32	22,47	0,59	100	19,94	24,42	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,29	0,677	0,674	0,997	16,69	15,70	16,37	25,65	0,67	100	19,81	24,90	0,14
40	4,29	0,677	0,630	0,931	16,69	15,70	16,37	23,01	0,60	100	20,30	24,97	1,66
160	4,29	0,677	0,610	0,902	16,69	15,70	16,37	22,00	0,58	100	20,05	24,46	2,08
Duplo Natural	4,29	0,674	-	-	16,74	15,72	16,39	4,29	0,57	19,70	15,82	16,50	-
Duplo Inundado	4,29	0,677	-	-	16,67	15,69	16,36	23,49	0,54	100	16,24	19,52	-

Quadro 9 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 90%.

SOLO GC = 90% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,46	0,584	0,580	0,993	20,11	16,62	17,36	21,47	0,56	100	16,51	20,05	0,95
40	4,46	0,578	0,529	0,916	20,31	16,68	17,43	18,90	0,50	100	16,66	19,81	2,01
160	4,46	0,580	0,450	0,777	20,25	16,66	17,41	14,21	0,37	100	16,60	18,96	5,26
Duplo Natural	4,46	0,576	-	-	20,36	16,70	17,44	4,46	0,55	21,42	16,70	17,44	-
Duplo Inundado	4,46	0,576	-	-	20,37	16,70	17,44	19,74	0,52	100	17,10	20,47	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,58	0,577	0,563	0,976	20,93	16,70	17,46	20,86	0,55	100	21,79	26,34	0,91
40	4,58	0,577	0,540	0,936	20,90	16,69	17,45	19,83	0,52	100	21,42	25,69	1,41
160	4,58	0,577	0,463	0,803	20,93	16,70	17,46	16,03	0,42	100	21,88	25,38	2,88
Duplo Natural	4,58	0,577	-	-	20,93	16,70	17,46	4,58	0,52	23,32	16,64	17,40	-
Duplo Inundado	4,58	0,577	-	-	20,92	16,69	17,46	19,59	0,51	100	21,56	25,81	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,56	0,601	0,595	0,990	19,99	16,44	17,19	22,35	0,59	100	21,09	25,81	0,54
40	4,56	0,600	0,566	0,943	20,01	16,45	17,20	20,72	0,54	100	21,32	25,74	1,38
160	4,56	0,600	0,507	0,845	20,02	16,45	17,20	17,66	0,46	100	21,83	25,69	2,83
Duplo Natural	4,56	0,600	-	-	20,04	16,45	17,21	4,56	0,55	21,74	16,51	17,27	-
Duplo Inundado	4,56	0,600	-	-	20,01	16,44	17,20	20,46	0,54	100	21,16	25,49	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,29	0,584	0,577	0,988	19,33	16,61	17,33	21,71	0,57	100	21,27	25,88	0,50
40	4,29	0,584	0,559	0,958	19,33	16,61	17,33	20,87	0,55	100	21,33	25,75	0,86
160	4,29	0,584	0,515	0,882	19,33	16,62	17,33	18,45	0,48	100	21,58	25,54	2,10
Duplo Natural	4,29	0,549	-	-	20,57	16,99	17,72	4,29	0,51	22,17	16,63	17,35	-
Duplo Inundado	4,29	0,549	-	-	20,57	16,99	17,72	20,07	0,50	100	21,27	25,63	-

Quadro 10 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 4% e Grau de Compactação de 95%.

SOLO GC = 95% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,46	0,504	0,499	0,991	23,28	17,50	18,28	18,49	0,49	100	17,44	20,65	0,75
40	4,46	0,506	0,485	0,958	23,17	17,47	18,25	17,64	0,47	100	17,07	20,07	1,28
160	4,46	0,504	0,389	0,772	23,28	17,50	18,28	12,80	0,34	100	16,80	18,96	3,84
Duplo Natural	4,46	0,499	-	-	23,51	17,56	18,34	4,46	0,45	25,94	17,52	18,30	-
Duplo Inundado	4,46	0,503	-	-	23,31	17,51	18,29	17,17	0,45	100	17,40	20,37	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,58	0,498	0,488	0,979	24,24	17,57	18,38	18,18	0,48	100	22,53	26,62	0,72
40	4,58	0,498	0,453	0,909	24,21	17,57	18,37	16,43	0,43	100	22,93	26,71	1,56
160	4,58	0,498	0,376	0,755	24,23	17,57	18,31	12,61	0,33	100	23,95	26,97	3,33
Duplo Natural	4,58	0,499	-	-	24,20	17,56	18,37	4,58	0,47	25,86	22,88	23,93	-
Duplo Inundado	4,58	0,499	-	-	24,20	17,56	18,37	17,68	0,45	100	22,62	26,66	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,56	0,512	0,505	0,987	23,48	17,41	18,21	18,89	0,50	100	22,34	26,56	0,56
40	4,56	0,512	0,476	0,931	23,48	17,41	18,21	17,30	0,45	100	22,72	26,65	1,52
160	4,56	0,512	0,394	0,769	23,46	17,41	18,20	13,24	0,35	100	23,40	26,49	3,32
Duplo Natural	4,56	0,512	-	-	23,48	17,41	18,21	4,56	0,48	24,96	17,41	18,21	-
Duplo Inundado	4,56	0,512	-	-	23,46	17,41	18,20	17,44	0,46	100	22,58	26,51	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 4%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	4,29	0,503	0,500	0,994	22,43	17,51	18,26	19,00	0,50	100	22,23	26,47	0,34
40	4,29	0,502	0,484	0,964	22,52	17,53	18,28	18,00	0,47	100	22,47	26,53	0,74
160	4,29	0,503	0,433	0,860	22,45	17,51	18,26	15,45	0,40	100	22,75	26,29	2,09
Duplo Natural	4,29	0,503	-	-	22,44	17,51	18,26	4,29	0,46	24,32	17,55	18,30	-
Duplo Inundado	4,29	0,503	-	-	22,43	17,51	18,26	17,45	0,46	100	22,35	26,25	-

Quadro 11 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 85%.

SOLO GC = 85% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,21	0,673	0,668	0,993	28,20	15,73	16,87	24,11	0,65	100	15,52	19,26	1,35
40	7,21	0,662	0,627	0,947	28,67	15,83	16,98	21,36	0,57	100	15,71	19,06	3,33
160	7,21	0,680	0,522	0,769	27,94	15,67	16,80	16,30	0,43	100	15,99	18,60	6,13
Duplo Natural	7,21	0,668	-	-	28,41	15,78	16,91	7,21	0,55	34,42	15,78	16,91	-
Duplo Inundado	7,21	0,670	-	-	28,32	15,76	16,89	20,63	0,54	100	15,87	19,14	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,01	0,649	0,644	0,993	28,45	15,96	17,08	24,24	0,64	100	20,35	25,29	0,43
40	7,01	0,649	0,603	0,930	28,46	15,96	17,08	21,94	0,58	100	19,61	23,91	1,61
160	7,01	0,648	0,560	0,865	28,51	15,98	17,10	20,00	0,53	100	17,96	21,56	2,18
Duplo Natural	7,01	0,647	-	-	28,56	15,99	17,11	7,01	0,61	30,39	21,43	22,94	-
Duplo Inundado	7,01	0,649	-	-	28,43	15,96	17,08	22,92	0,60	100	17,82	21,91	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,27	0,680	0,674	0,992	28,16	15,67	16,81	25,65	0,67	100	15,93	20,04	0,35
40	7,27	0,680	0,635	0,934	28,14	15,67	16,80	23,19	0,61	100	16,33	20,12	1,60
160	7,27	0,680	0,573	0,844	28,15	15,67	16,81	21,09	0,54	100	17,77	21,56	2,14
Duplo Natural	7,27	0,680	-	-	28,12	15,66	16,80	7,27	0,61	31,58	18,30	19,63	-
Duplo Inundado	7,27	0,679	-	-	28,16	15,67	16,81	22,06	0,61	100	17,44	21,91	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 85% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,06	0,729	0,724	0,994	25,49	15,23	16,30	27,34	0,72	100	15,84	20,17	0,27
40	7,06	0,730	0,676	0,927	25,44	15,21	16,29	24,74	0,65	100	16,13	20,12	1,52
160	7,06	0,730	0,636	0,871	25,43	15,21	16,29	22,94	0,60	100	17,80	21,89	2,03
Duplo Natural	7,06	0,731	-	-	25,42	15,21	16,28	7,06	0,67	27,67	21,42	22,94	-
Duplo Inundado	7,06	0,732	-	-	25,36	15,19	16,27	25,27	0,66	100	16,61	20,81	-

Quadro 12 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 90%.

SOLO GC = 90% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,21	0,577	0,572	0,991	32,88	16,69	17,89	21,13	0,56	100	17,00	20,59	1,01
40	7,21	0,578	0,553	0,956	32,83	16,68	17,88	20,07	0,53	100	15,87	19,06	1,61
160	7,21	0,570	0,500	0,877	33,29	16,76	17,97	16,98	0,45	100	17,03	19,92	3,50
Duplo Natural	7,21	0,573	-	-	33,15	16,73	17,94	7,21	0,55	34,82	16,70	17,91	-
Duplo Inundado	7,21	0,574	-	-	33,08	16,72	17,93	18,61	0,50	100	16,14	19,14	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,01	0,563	0,558	0,992	32,82	16,84	18,03	20,04	0,55	100	17,74	21,54	0,44
40	7,01	0,563	0,528	0,938	32,80	16,84	18,02	18,93	0,51	100	16,95	20,12	1,25
160	7,01	0,564	0,506	0,897	32,74	16,83	18,01	18,42	0,48	100	19,13	22,66	1,52
Duplo Natural	7,01	0,565	-	-	32,66	16,82	17,99	7,01	0,50	36,85	16,82	18,00	-
Duplo Inundado	7,01	0,566	-	-	32,60	16,80	17,98	19,89	0,52	100	18,27	21,91	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,27	0,594	0,589	0,992	32,23	16,51	17,72	22,21	0,58	100	16,91	20,67	0,30
40	7,27	0,594	0,568	0,956	32,20	16,51	17,71	20,89	0,55	100	16,64	20,12	1,25
160	7,27	0,582	0,539	0,926	32,88	16,64	17,85	19,04	0,52	100	17,89	21,56	1,31
Duplo Natural	7,27	0,584	-	-	32,76	16,62	17,82	7,27	0,54	35,59	21,38	22,94	-
Duplo Inundado	7,27	0,583	-	-	32,84	16,63	17,84	20,11	0,54	100	18,13	21,91	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 90% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,06	0,634	0,629	0,993	29,32	16,11	17,25	23,72	0,62	100	17,01	21,04	0,29
40	7,06	0,636	0,597	0,938	29,21	16,09	17,23	21,76	0,58	100	17,32	21,12	1,24
160	7,06	0,636	0,581	0,913	29,21	16,09	17,23	21,22	0,56	100	16,39	19,93	1,30
Duplo Natural	7,06	0,561	-	-	33,08	16,86	18,05	7,06	0,53	35,33	16,36	17,52	-
Duplo Inundado	7,06	0,561	-	-	33,12	16,86	18,05	19,61	0,51	100	16,57	19,82	-

Quadro 13 - Condições iniciais e finais dos corpos de provas dos ensaios Edométricos Simples e Duplos com umidade de 7% e Grau de Compactação de 95%.

SOLO GC = 95% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,21	0,494	0,492	0,997	38,46	17,62	18,89	18,10	0,49	100	17,62	20,80	0,25
40	7,21	0,503	0,485	0,964	37,78	17,52	18,78	17,68	0,47	100	17,70	20,82	1,14
160	7,21	0,497	0,430	0,866	38,21	17,58	18,85	15,02	0,40	100	17,80	20,47	2,20
Duplo Natural	7,21	0,505	-	-	37,63	17,49	18,76	7,21	0,45	41,92	17,63	18,90	-
Duplo Inundado	7,21	0,493	-	-	38,49	17,63	18,90	16,60	0,44	100	18,40	21,46	-
10% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,01	0,489	0,485	0,993	37,79	17,68	18,92	18,21	0,48	100	17,99	21,29	0,23
40	7,01	0,489	0,468	0,957	37,76	17,68	18,92	17,26	0,45	100	18,22	21,37	0,94
160	7,01	0,488	0,447	0,917	37,85	17,69	18,93	16,38	0,43	100	19,27	22,44	1,19
Duplo Natural	7,01	0,488	-	-	37,84	17,69	18,93	7,01	0,44	42,20	21,43	22,94	-
Duplo Inundado	7,01	0,488	-	-	37,84	17,69	18,93	16,17	0,43	100	18,85	21,91	-
30% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,27	0,510	0,509	0,998	37,51	17,43	18,70	19,22	0,51	100	17,75	21,17	0,24
40	7,27	0,510	0,482	0,946	37,53	17,43	18,70	17,84	0,47	100	18,12	21,37	0,91
160	7,27	0,509	0,455	0,896	37,63	17,45	18,72	15,88	0,44	100	18,44	21,56	1,09
Duplo Natural	7,27	0,509	-	-	37,62	17,45	18,71	7,27	0,48	39,99	21,38	22,94	-
Duplo Inundado	7,27	0,510	-	-	37,52	17,43	18,70	18,33	0,48	100	18,51	21,91	-
50% RCC#30 + 90% SOLO GC = 95% W = 7%													
Inicial								Final					
σ_i	w_i	e_0	e_a	e_a/e_0	S_r	γ_s	γ_h	w_f	e_f	S_r	γ_s	γ_h	Potencial de Colapso
	%	-	-	-	%	kN/m ³	kN/m ³	%	-	-	kN/m ³	kN/m ³	
10	7,06	0,546	0,544	0,997	34,04	17,03	18,23	20,58	0,54	100	17,66	21,29	0,18
40	7,06	0,546	0,519	0,951	34,02	17,02	18,23	19,14	0,51	100	17,79	21,24	0,72
160	7,06	0,545	0,496	0,911	34,11	17,04	18,25	18,26	0,48	100	17,52	20,72	1,04
Duplo Natural	7,06	0,491	-	-	37,81	17,65	18,90	7,06	0,46	40,69	17,16	18,37	-
Duplo Inundado	7,06	0,493	-	-	37,69	17,63	18,88	16,49	0,44	100	17,75	20,73	-

APÊNDICE B

Potenciais de Colapso das amostras em vários níveis de tensão, segundo critério de Jennings e Knight (1975) dos ensaios edométricos duplos

Tabela 24 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 0,2%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
Solo GC 85% w = 0,2%	10	1,54	Problema moderado
	20	1,72	Problema moderado
	40	1,81	Problema moderado
	80	2,44	Problema moderado
	160	2,67	Problema moderado
	320	2,55	Problema moderado
	640	3,54	Problema moderado
Solo GC 90% w = 0,2%	10	0,89	Sem problema
	20	1,14	Problema moderado
	40	1,45	Problema moderado
	80	1,72	Problema moderado
	160	2,16	Problema moderado
	320	2,46	Problema moderado
	640	2,18	Problema moderado
Solo GC 95% w = 0,2%	10	0,36	Sem problema
	20	0,75	Sem problema
	40	1,28	Problema moderado
	80	1,88	Problema moderado
	160	2,36	Problema moderado
	320	2,88	Problema moderado
	640	3,47	Problema moderado

Tabela 25 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
Solo GC 85% w = 4%	10	1,23	Problema moderado
	20	2,04	Problema moderado
	40	2,32	Problema moderado
	80	2,83	Problema moderado
	160	4,24	Problema moderado
	320	6,62	Problemático
	640	7,70	Problemático
Solo GC 90% w = 4%	10	0,62	Sem problema
	20	1,20	Problema moderado
	40	1,39	Problema moderado
	80	1,50	Problema moderado
	160	1,94	Problema moderado
	320	2,63	Problema moderado
	640	3,50	Problema moderado
Solo GC 95% w = 4%	10	0,15	Sem problema
	20	0,45	Sem problema
	40	0,68	Sem problema
	80	0,85	Sem problema
	160	0,64	Sem problema
	320	0,19	Sem problema
	640	0,40	Sem problema

Tabela 26 - Potenciais de Colapso do Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
Solo GC 85% w = 7%	10	1,52	Problema moderado
	20	2,79	Problema moderado
	40	3,05	Problema moderado
	80	3,13	Problema moderado
	160	2,88	Problema moderado
	320	2,00	Problema moderado
	640	0,56	Sem problema
Solo GC 90% w = 7%	10	1,03	Problema moderado
	20	1,78	Problema moderado
	40	1,88	Problema moderado
	80	2,29	Problema moderado
	160	2,79	Problema moderado
	320	3,71	Problema moderado
	640	5,02	Problemático
Solo GC 95% w = 7%	10	0,94	Sem problema
	20	1,36	Problema moderado
	40	1,35	Problema moderado
	80	1,45	Problema moderado
	160	1,46	Problema moderado
	320	1,37	Problema moderado
	640	1,45	Problema moderado

Tabela 27 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
10% de RCC + 90% de Solo GC 85% w = 1%	10	0,64	Sem problema
	20	1,25	Problema moderado
	40	1,42	Problema moderado
	80	1,68	Problema moderado
	160	2,00	Problema moderado
	320	2,29	Problema moderado
	640	2,78	Problema moderado
10% de RCC + 90% de Solo GC 90% w = 1%	10	0,45	Sem problema
	20	1,21	Problema moderado
	40	1,54	Problema moderado
	80	1,74	Problema moderado
	160	1,70	Problema moderado
	320	1,37	Problema moderado
	640	0,82	Sem problema
10% de RCC + 90% de Solo GC 95% w = 1%	10	0,50	Sem problema
	20	1,01	Problema moderado
	40	1,33	Problema moderado
	80	1,46	Problema moderado
	160	1,53	Problema moderado
	320	1,65	Problema moderado
	640	2,04	Problema moderado

Tabela 28 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
10% de RCC + 90% de Solo GC 85% w = 4%	10	0,65	Sem problema
	20	1,48	Problema moderado
	40	2,07	Problema moderado
	80	3,22	Problema moderado
	160	4,33	Problema moderado
	320	3,79	Problema moderado
	640	2,97	Problema moderado
10% de RCC + 90% de Solo GC 90% w = 4%	10	0,21	Sem problema
	20	0,30	Sem problema
	40	0,34	Sem problema
	80	0,32	Sem problema
	160	0,30	Sem problema
	320	0,28	Sem problema
	640	0,69	Sem problema
10% de RCC + 90% de Solo GC 95% w = 4%	10	0,45	Sem problema
	20	0,89	Sem problema
	40	0,98	Sem problema
	80	1,06	Problema moderado
	160	1,08	Problema moderado
	320	1,21	Problema moderado
	640	3,47	Problema moderado

Tabela 29 - Potenciais de Colapso da mistura com 10% de RCC + 90% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
10% de RCC + 90% de Solo GC 85% w = 7%	10	0,01	Sem problema
	20	0,08	Sem problema
	40	0,22	Sem problema
	80	0,42	Sem problema
	160	0,88	Sem problema
	320	1,45	Problema moderado
	640	0,62	Sem problema
10% de RCC + 90% de Solo GC 90% w = 7%	10	0,21	Sem problema
	20	0,46	Sem problema
	40	0,40	Sem problema
	80	0,60	Sem problema
	160	0,44	Sem problema
	320	0,38	Sem problema
	640	0,01	Sem problema
10% de RCC + 90% de Solo GC 95% w = 7%	10	0,51	Sem problema
	20	0,96	Sem problema
	40	1,05	Problema moderado
	80	1,41	Problema moderado
	160	1,56	Problema moderado
	320	2,03	Problema moderado
640	1,03	Problema moderado	

Tabela 30 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
30% de RCC + 70% de Solo GC 85% w = 1%	10	1,16	Problema moderado
	20	2,51	Problema moderado
	40	2,80	Problema moderado
	80	3,07	Problema moderado
	160	3,28	Problema moderado
	320	2,94	Problema moderado
	640	2,10	Problema moderado
30% de RCC + 70% de Solo GC 90% w = 1%	10	1,12	Problema moderado
	20	2,00	Problema moderado
	40	2,00	Problema moderado
	80	1,97	Problema moderado
	160	2,59	Problema moderado
	320	3,42	Problema moderado
	640	1,00	Sem problema
30% de RCC + 70% de Solo GC 95% w = 1%	10	0,54	Sem problema
	20	1,03	Problema moderado
	40	0,93	Sem problema
	80	0,77	Sem problema
	160	0,34	Sem problema
	320	0,25	Sem problema
	640	0,23	Sem problema

Tabela 31 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
30% de RCC + 70% de Solo GC 85% w = 4%	10	0,46	Sem problema
	20	0,73	Sem problema
	40	0,97	Sem problema
	80	1,42	Problema moderado
	160	1,61	Problema moderado
	320	1,76	Problema moderado
	640	2,05	Problema moderado
30% de RCC + 70% de Solo GC 90% w = 4%	10	0,17	Sem problema
	20	0,78	Sem problema
	40	1,10	Problema moderado
	80	1,22	Problema moderado
	160	1,51	Problema moderado
	320	1,62	Problema moderado
	640	1,71	Problema moderado
30% de RCC + 70% de Solo GC 95% w = 4%	10	0,17	Sem problema
	20	0,76	Sem problema
	40	1,34	Problema moderado
	80	1,79	Problema moderado
	160	2,14	Problema moderado
	320	2,41	Problema moderado
	640	2,64	Problema moderado

Tabela 32 - Potenciais de Colapso da mistura com 30% de RCC + 70% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
30% de RCC + 70% de Solo GC 85% w = 7%	10	0,80	Sem problema
	20	1,30	Problema moderado
	40	0,92	Sem problema
	80	0,76	Sem problema
	160	0,67	Sem problema
	320	-0,34	Sem problema
	640	-1,05	Sem problema
30% de RCC + 70% de Solo GC 90% w = 7%	10	0,27	Sem problema
	20	0,60	Sem problema
	40	1,00	Sem problema
	80	0,90	Sem problema
	160	1,08	Problema moderado
	320	1,04	Problema moderado
	640	1,38	Problema moderado
30% de RCC + 70% de Solo GC 95% w = 7%	10	0,02	Sem problema
	20	0,22	Sem problema
	40	0,43	Sem problema
	80	0,73	Sem problema
	160	0,85	Sem problema
	320	0,82	Sem problema
	640	0,82	Sem problema

Tabela 33 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 1%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
50% de RCC + 50% de Solo GC 85% w = 1%	10	0,49	Sem problema
	20	0,83	Sem problema
	40	0,76	Sem problema
	80	0,94	Sem problema
	160	1,18	Problema moderado
	320	1,40	Problema moderado
	640	1,65	Problema moderado
50% de RCC + 50% de Solo GC 90% w = 1%	10	0,54	Sem problema
	20	1,19	Problema moderado
	40	1,03	Problema moderado
	80	1,14	Problema moderado
	160	0,86	Sem problema
	320	0,77	Sem problema
	640	1,14	Problema moderado
50% de RCC + 50% de Solo GC 95% w = 1%	10	0,50	Sem problema
	20	0,69	Sem problema
	40	0,60	Sem problema
	80	0,53	Sem problema
	160	0,38	Sem problema
	320	0,18	Sem problema
	640	0,40	Sem problema

Tabela 34 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 4%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
50% de RCC + 50% de Solo GC 85% w = 4%	10	0,01	Sem problema
	20	0,27	Sem problema
	40	0,24	Sem problema
	80	0,90	Sem problema
	160	1,74	Problema moderado
	320	3,05	Problema moderado
	640	2,96	Problema moderado
50% de RCC + 50% de Solo GC 90% w = 4%	10	0,20	Sem problema
	20	0,35	Sem problema
	40	0,45	Sem problema
	80	0,28	Sem problema
	160	0,29	Sem problema
	320	0,27	Sem problema
	640	0,52	Sem problema
50% de RCC + 50% de Solo GC 95% w = 4%	10	0,25	Sem problema
	20	0,53	Sem problema
	40	0,44	Sem problema
	80	0,32	Sem problema
	160	0,25	Sem problema
	320	0,29	Sem problema
	640	0,43	Sem problema

Tabela 35 - Potenciais de Colapso da mistura com 50% de RCC + 50% de Solo em Vários Níveis de Tensão segundo critério de Jennings e Knight (1975) na umidade de 7%.

Amostra	Tensão (kPa)	Jennings e Knight (1975)	
50% de RCC + 50% de Solo GC 85% w = 7%	10	0,65	Sem problema
	20	1,08	Problema moderado
	40	0,51	Sem problema
	80	0,26	Sem problema
	160	0,43	Sem problema
	320	0,26	Sem problema
	640	0,26	Sem problema
50% de RCC + 50% de Solo GC 90% w = 7%	10	0,69	Sem problema
	20	0,92	Sem problema
	40	1,03	Problema moderado
	80	1,03	Problema moderado
	160	1,06	Problema moderado
	320	0,99	Sem problema
	640	0,88	Sem problema
50% de RCC + 50% de Solo GC 95% w = 7%	10	0,14	Sem problema
	20	0,43	Sem problema
	40	0,20	Sem problema
	80	0,31	Sem problema
	160	0,21	Sem problema
	320	0,51	Sem problema
	640	1,07	Problema moderado