



**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AGREGADO
RECICLADO COMO BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL A
PARTIR DE UM MODELO FÍSICO**

MARCUS VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, MSc.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**G.TD - 109/15
JUNHO / 2015**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AGREGADO
RECICLADO COMO BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL A
PARTIR DE UM MODELO FÍSICO**

MARCUS VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, MSc.

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.

CO-ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD - 109/15

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2015

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AGREGADO
RECICLADO COMO BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL A
PARTIR DE UM MODELO FÍSICO**

MARCUS VINICIUS RIBEIRO E SOUZA, MSc.

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**LÍLIAN RIBEIRO DE REZENDE, DSc (UFG)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR, DSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 26 de JUNHO de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO E

Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento

Flexível a partir de um Modelo Físico. [Distrito Federal] 2015.

xx, 125 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2015) Tese de Doutorado -
Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Agregado Reciclado

2. RCD

3. Material de base

4. Modelo Físico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, M.V.R. (2015). Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento Flexível a partir de um Modelo Físico. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-109/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcus Vinícius Ribeiro e Souza

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento Flexível a partir de um Modelo Físico.

GRAU / ANO: Doutor / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcus Vinícius Ribeiro e Souza

405 Sul, Alameda 28, QI 12 Lt. 02 Casa 1

77.015-647 – Palmas/TO – Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Aos meus pais, Péricles e Celeste Maria, principais responsáveis e incentivadores da minha educação. Ao meu amável irmão Paulo de Tarso, que sempre foi o meu torcedor número um, sempre vibrando e compartilhando momentos bons de nossas vidas. A minha eterna amiga e esposa Janaina que a sete anos vem compartilhando os maravilhosos momentos e dificuldades da vida.

AGRADECIMENTOS

Por mais um ciclo que se fecha, agradeço a **Deus** por me manter forte perante as adversidades e dificuldades durante a elaboração do trabalho. Fundamental para minha sustentação espiritual e humana Ele se fez presente, e a Ele sou eternamente grato.

Péricles e **Celeste Maria**, meus amáveis pais, eu agradeço por me proporcionarem a maior herança que poderiam me conceder: a Educação em seu sentido mais amplo possível. Ao meu melhor amigo e companheiro desses 31 anos, meu amável irmão **Paulo de Tarso**, sou grato pelos momentos maravilhosos que tivemos juntos, pelos incentivos e carinho sempre característicos do seu imenso coração. Coração, que divido alegremente com minha cunhada **Rebeca** e meu lindo sobrinho **Theo** que fazem parte da minha vida e adoçam meu viver. A todos meus parentes paterno e materno em especial minhas avós **Nena** e **Tereza** (*in memória*) que sempre fizeram e me fazem pensar o real sentido da vida.

A **Janaina Araújo** minha amiga e amorosa esposa agradeço todos os dias por Deus me conceder o seu convívio e amor. Em especial, agradeço pela paciência, atenção, cuidados e incentivos intermináveis que se sucederam durante a elaboração deste trabalho. – Você sabe que: *O pior não é não conseguir / É desistir de tentar / Não acredite no que eles dizem (...)* / (...) *Se entregar seria fraquejar (...)* (*Vanessa da Mata*).

Aos meus primeiros pais acadêmicos, Prof.^a **Miriam de Fátima Carvalho** e Prof. **Sandro Lemos Machado**, agradeço eternamente pelas primeiras orientações acadêmicas e em me fazer olhar a Geotecnia e o meio acadêmico como uma maravilhosa opção de vida e de trabalho. De maneira particular agradeço também pela amizade e carinho que tenho de vocês.

Ao Prof. **Márcio Muniz de Farias** fica aqui meu agradecimento por ser meu orientador tanto no mestrado como no doutorado – Professor, muito obrigado por ter me proporcionado tê-lo como mestre e orientador ao longo desses sete anos, tenha certeza que valeu as brigas, os conselhos e as risadas para meu amadurecimento acadêmico e pessoal, novamente meu muito obrigado pela amizade e por me fazer um profissional melhor.

A toda equipe, professores e funcionários, do **Programa de Pós-Graduação em Geotecnia**, agradeço por contribuírem para minha formação. Em especial ao Prof. **Ennio Marques Palmeira**, pela co-orientação, por está sempre disposto em me ajudar durante a pesquisa e pelo conhecimento adquirido durante as aulas e pela amizade firmada.

Agradeço pelo apoio científico encontrado no **Laboratório de Infraestrutura – INFRALAB da UnB**, pois foi fundamental para realização e sucesso desta pesquisa. A toda

equipe técnica do laboratório principalmente **Sr. Gilson** que contribuiu para o sucesso de meus ensaios e análises.

Agradeço ao grupo de parceiros que auxiliaram para o êxito da pesquisa, como o Laboratório de Processos de Fabricação - Departamento de Engenharia Mecânica em nome dos técnicos **Sr. Artur e Marcos**, ao Laboratório de Geocronologia em nome do **Prof. Elton**, ao Centro de Manutenção de Equipamentos da UnB - CME agradeço pelo suporte técnico em nome do técnico **Sr. Reginaldo**, ao **Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP** da Universidade Federal do Ceará, em nome da **Prof.^a Verônica Castelo Branco**, a empresas **Areia Bela Vista** e a **SCCAP engenharia** por auxílio durante a pesquisa. Em especial agradeço ao **Sr. José Gonsalves** que com seu conhecimento técnico e sua paixão em tentar resolver problemas não mediu esforços em me ajudar.

Durante a pesquisa pessoas passam e acabam fazendo parte da nossa história e a elas devoto meu agradecimento pelas verdadeiras demonstrações de amizade. Dentre estas pessoas se encontram meus amigos e colegas do PPG-UnB, Paulo André, Jorge Estban, John Eloi, Edson Rocha, Juliana Serna, Janaina Tatto, Raimundo Gonzaga, Igor Mota, Lorena Duarte, Alexandre Resque, Jaqueline Ferreira, Aureliano Alves, Larissa Aguiar, Fernando Aquino, Carlos Eduardo, Hellen Karoline, James Silva, Paola Alves, Paula Emanoela, Rafaela Silveira, Carlos Petrônio, Elmagno Catarino, Luiz Guilherme.

Em especial, agradeço aos meus amigos e irmãos **Luiz Gustavo, Josileide Silva, Maria Tâmara, Pedro Luiz, João Paulo, Eder Santos e Bruno Rogério** pelo sincero e mais puro sentimento de amizade que os tornaram, para mim, parte da minha família.

Meu profundo agradecimento aos meus amigos Colombianos e de luta diária **Robinson G. Zuluaga, Ivonne Gutierrez, Jaime Obando, Cláudia Muñetón, Juan Bastidas e Ferney Quiñones** que nunca medindo esforços fizeram papéis importantes para o êxito da pesquisa. Em especial aos meus amigos **Iván F. e Alejandra María** pela grande amizade que nutri um sentimento familiar entre nós.

Aos amigos **Raydel e Elizabeth** agradeço por sempre se demonstrarem dispostos a me ajudar no transcorrer da pesquisa.

Aos amigos de infância **Igor Matos, Jack Villarpando, Sidney Paty, Antônio Azevedo, Eduardo Estelitano e Lucas Lobo** muito obrigado por fazerem parte da minha vida. E a outros amigos feitos durante a graduação deixo meus sinceros agradecimentos por terem contribuído na minha formação profissional.

Agradeço aos colegas e ao Colegiado de Engenharia Civil da **Universidade Federal do Tocantins – UFT**.

E ao apoio financeiro fomentado pelo **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq** e **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES**.

A todos vocês,

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento Flexível a partir de um Modelo Físico.

Publicação G.TD-109/15, Pós-Graduação em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p. Data: 26 de Junho de 2015.

Autor: Marcus Vinícius Ribeiro e Souza, MSc.

Orientador: Márcio Muniz de Farias-PhD, Co-orientador: Ennio Marques Palmeiras-PhD

Em dias atuais a preocupação por soluções sustentáveis para a redução do consumo acelerado de recursos minerais não renováveis e a inserção de resíduos beneficiados na cadeia produtiva vem promovendo novas pesquisas com materiais alternativos para o setor da construção civil. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de pavimentos flexíveis construídos com o emprego de agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), proveniente da demolição do estádio Mané Garrincha da cidade de Brasília, capital do Brasil, em camadas de base, por meio, de um modelo físico de verdadeira grandeza. No modelo, buscou-se simular em laboratório as condições mais próximas às condições de campo, de maneira mais controlada, construindo uma estrutura de pavimento tipo composta por camadas de subleito, base e revestimento, no interior de uma caixa de dimensões iguais a 1,60 m x 1,60 m x 1,20 m de altura. Os carregamentos transmitidos ao pavimento foram aplicados com auxílio de uma viga de reação e um cilindro hidráulico acoplado a uma unidade de força que submetiam uma placa rígida de diâmetro igual a 300 mm a carregamentos cíclicos da ordem de 40 kN e frequência de aplicação de 1 Hz. Os resultados dos ensaios no modelo físico indicam que, apesar do comportamento complexo devido à sua heterogeneidade, o agregado reciclado (AR) proveniente do beneficiamento de resíduos da construção civil demonstrou características positivas e desejáveis para a sua aplicação em obras de infraestrutura rodoviária, visto que os valores das instrumentações apontaram para um bom comportamento da estrutura do modelo físico. As análises de deformação e deslocamentos permanentes permitiram concluir que o modelo experimental tanto a estrutura como a camada de base teriam condições de suportar mais ciclos de carga sem atingir critérios limites de intervenção para pavimentos flexíveis. De maneira complementar os ensaios de módulo de resiliência, Índice de Suporte Califórnia o RCD demonstrou um bom desempenho frente às condições mínimas exigidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT do Brasil, validando que a reciclagem pode ser uma solução sustentável para o destino do RCD de forma a compensar a extração exaustiva dos recursos minerais.

Palavras chave: Agregado Reciclado, RCD, Material de base, Modelo físico.

ABSTRACT

TITLE: Mechanical behavior of a recycled aggregate as base of a flexible pavement from a physical model.

Author: Marcus Vinícius Ribeiro e Souza, MSc.

Orientador: Márcio Muniz de Farias-PhD, Co-orientador: Ennio Marques Palmeiras-PhD

Nowadays, concern about sustainable solutions for decreasing the consumption of renewable mineral resources and the insertion of enhanced waste on the productive chain has been promoting new research using alternative materials for the construction sector. This research had the objective of assessing the behavior of flexible pavement built with Construction and Demolition Waste in base layers through a physical model in true magnitude. The Construction and Demolition Waste (CDW) came from the stadium Mané Garrincha at Brasilia, Brazil. The model sought simulating at the laboratory the closest conditions to the field condition, but in a more controlled way, by building a pavement structure made of subgrade, base and pavement layers inside a box of 1,60 m x 1,60 m x 1,20 m high. The loads transmitted to the paving were applied by means of a reaction beam and a hydraulic cylinder coupled to a force unit. The equipment applied cyclic loading of about 40 kN with a frequency of 1 Hz to a rigid plate of 300 mm of diameter. The results of the physical model suggest that, despite of the complexities coming from heterogeneities, the recycled aggregate from enhanced waste of civil construction demonstrated positive and desirable characteristics for its application on road infrastructure, because the values of instrumentation pointed to a good behavior of the structure of the physical model. Analysis of deformations and permanent displacements allowed concluding that both the structure and the base layer would have conditions to support more loading cycles without reaching limit intervention criteria for flexible paving. Resilience module test and California Bearing Ratio (CBR) for the construction and demolition waste showed good behavior for the minimal conditions required by the National Department of Transport and Infrastructure of Brazil. This validates that recycling is a sustainable solution for construction and demolition waste and a way of compensating the extraction of mineral resources.

Keywords: Recycled aggregates; CDW, base material, physical model.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 HISTÓRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO (RCD-R) EM OBRAS GEOTÉCNICAS.....	5
1.2 SITUAÇÃO DO RCD-R NO DISTRITO FEDERAL	7
1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	9
1.4 OBJETIVO DA PESQUISA.....	9
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
CAPÍTULO 2.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – RCD	10
2.2 ESPECIFICAÇÕES DAS NORMAS APLICADAS AO USO DE RCD PARA PAVIMENTAÇÃO.....	13
2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO APLICADO À PAVIMENTAÇÃO.....	14
2.4 MODELOS EXPERIMENTAIS DE GRANDE ESCALA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	17
2.5 FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	26
2.5.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ANÁLISE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA PAVIMENTOS	26
CAPÍTULO 3.....	34
3. MATERIAIS E METODOLOGIA	34
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	34
3.1.1 AGREGADO RECICLADO (AR)	35
3.1.2 LIGANTE ASFÁLTICO	37
3.1.3 ASFALTO DILUÍDO	37
3.1.4 SOLO DE SUBLEITO PARA O MODELO FÍSICO	38
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA	41
3.3 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	41
3.4 MODELO FÍSICO	44

3.4.1 METODOLOGIA DE MONTAGEM DO ENSAIO.....	47
3.4.2 INSTRUMENTAÇÃO DO MODELO FÍSICO	54
3.5 RETROANÁLISES	62
CAPÍTULO 4.....	66
4. RESULTADOS.....	66
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO RCD-R	66
4.1.1 AGGREGATE IMAGING SYSTEM (AIMS)	72
4.1.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR	78
4.1.3 ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	80
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO	81
4.3 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	87
4.4 MODELO FÍSICO DE VERDADEIRA GRANDEZA.....	88
4.4.1 ANÁLISES DE CONTROLE TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS	88
4.4.2 ANÁLISES DO ENSAIO DE CARREGAMENTO CÍCLICO	94
4.4.3 RETROANÁLISE DO MODELO FÍSICO.....	104
CAPÍTULO 5.....	114
5. CONCLUSÕES.....	114
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Pilha de entulho resultante da demolição de hotel em Brasília – DF.	3
Figura 1.2. Percentual de consumo setorial de rocha britada – 2007 (DNPM, 2009).....	4
Figura 1.3. Número de trabalhos publicados nos COBRAMSEG entre 1998-2012 com RCD aplicados a obras geotécnicas (SOUZA, 2010).....	6
Figura 1.4. Conformação da parte superior da célula do aterro com a utilização de RCD.	8
Figura 2.1. Composição média aproximada do RCD (CREA-SP, 2005)	11
Figura 2.2. Esquema geral do equipamento de carregamento cíclico de grande escala (ANTUNES, 2008).....	18
Figura 2.3. Esquema do tanque teste utilizado por Silva (2009a) (Adaptado de SILVA, 2009a)	19
Figura 2.4. Vista geral do equipamento desenvolvido por Kakuda (2010).....	20
Figura 2.5. Esquema do equipamento de grande escala utilizado por Perkins (1999).....	21
Figura 2.6. Configuração experimental (LING & LIU, 2001).....	21
Figura 2.8. Configuração experimental (DEMERCHANT, VALSANKAR & SCHRIVER, 2002).....	22
Figura 2.8. Comparação dos resultados experimentais em pequena escala e em grande escala (modificado de AMIRI, NAZARIAN & FERNANDO, 2009).....	24
Figura 2.9. Simuladores de tráfego: (a) do CCRDI, (b) da UFRGS/DAER-RS em Porto Alegre e (c) do IPR Rio de Janeiro.	25
Figura 3.1. Esquema de produção adotado pela Areia Bela Vista na produção do agregado reciclado	35
Figura 3.2. Resultado final após segundo processo de britagem	36
Figura 3.3. Metodologia empregada para coleta e classificação do RCD.....	36
Figura 3.4. Vista aérea da região de coleta do material do subleito.....	39
Figura 3.5. Preparação do solo do subleito para caracterização.....	39
Figura 3.6. Perfil geotécnico típico do subsolo da região e procedimento de coleta do solo ..	40
Figura 3.7. Preparação do solo destinado ao subleito	40
Figura 3.8. Etapas para realização do ensaio de módulo de resiliência	42
Figura 3.9. Vista da caixa de ensaio com a face lateral aberta utilizada por Antunes (2008)..	44
Figura 3.10. Caixa experimental de madeira.....	45
Figura 3.11. Construção da camada experimental de subleito.....	45
Figura 3.12. Procedimento de compactação da camada de subleito	46
Figura 3.13. Procedimentos de controle da compactação	47
Figura 3.14. Esquema idealizado para o modelo físico de verdadeira grandeza (Adaptado de ANTUNES, 2008).....	47
Figura 3.15. Tratamento da superfície das paredes da caixa.....	48

Figura 3.16. Instalação da instrumentação na camada de subleito. (a, b, c, d) posicionamento e nivelamento da célula de tensão total, (e) definição da cota de implantação.....	49
Figura 3.17. Execução da camada de subleito. (a) homogeneização do solo, (b) descarga do solo, (c) espalhamento do solo e (d) nivelamento do solo.	49
Figura 3.18. Trincamento da camada de subleito e procedimento de proteção contra perda de umidade	50
Figura 3.19. Instalação da instrumentação na transição da camada de base e subleito	51
Figura 3.20. Procedimentos de imprimação da camada de base	52
Figura 3.21. Procedimentos de execução da camada de revestimento.....	53
Figura 3.22. Posicionamento e montagem do sistema de aplicação de carga e instrumentação.	54
Figura 3.23. Esquema de disposição da instrumentação	55
Figura 3.24. Célula de carga CCI da Kratos equipamentos capacidade 10 tf	56
Figura 3.25. Calibração da célula de carga	56
Figura 3.26. Medidor de deslocamento linear PY2 da GEFTRAN curso 100 mm	57
Figura 3.27. Procedimentos para calibração dos transdutores de deslocamento	57
Figura 3.28. CTT utilizada no modelo experimental	58
Figura 3.29. Caixa de calibração das CTT	59
Figura 3.30. Procedimento de compactação do material para calibração das CTT	59
Figura 3.31. Metodologia e cuidados para o posicionamento da CTT	60
Figura 3.32. Ilustração da proteção da CTT que fica em contato com o material grosseiro....	61
Figura 3.33. Arranjos para a calibração das células de tensão total.....	62
Figura 3.34. Fluxograma das análises da correlação entre o ensaio de verdadeira grandeza e modelos numéricos.....	63
Figura 3.35. Casos axissimétricos considerados nas análises	65
Figura 4.1. Materiais que constituem o RCD	66
Figura 4.2. Composição do RCD-R sem considerar a fração materiais finos (< 4,75 mm)....	67
Figura 4.3. Distribuição granulométrica do RCD-R <i>versus</i> Faixa C para Base.....	68
Figura 4.4. Equipamento AIMS (<i>Aggregate Imaging System</i>)	72
Figura 4.5. Gráfico das razões de alongamento e achatamento do agregado reciclado	74
Figura 4.6. Gráfico de distribuição de cubicidade do agregado reciclado	75
Figura 4.7. Gráfico de distribuição de angularidade do agregado reciclado	76
Figura 4.8. Gráfico de distribuição de textura do agregado reciclado	77
Figura 4.9. Características físicas do agregado reciclado, (a) partícula de agregado calcário e (b) concreto, respectivamente.	77
Figura 4.10. Curva de compactação obtida para energia modificada	78
Figura 4.11. Aspecto do agregado reciclado com a variação da umidade após compactação. 79	

Figura 4.12. Curvas granulométricas do solo para o subleito do modelo físico de verdadeira grandeza	82
Figura 4.13. Procedimento de compactação do solo de do subleito	84
Figura 4.14. Curva de compactação do material destinado a camada de subleito (1ª coleta)..	84
Figura 4.15. Realização dos ensaios de expansão e Índice de Suporte Califórnia no solo do destinado ao Subleito	85
Figura 4.16. Curva de compactação do material destinado a camada de subleito (2ª coleta)..	86
Figura 4.17. Resultados de módulo de resiliência do agregado reciclado de RCD com diferentes energias de compactação (modificada de GÓMEZ, 2011)	87
Figura 4.18. Variação do módulo de resiliente vs. o Modelo Universal e o Modelo Composto para o solo de subleito	88
Figura 4.19. Plano de amostragem do revestimento	92
Figura 4.20. Variação da espessura do revestimento em centímetros.....	93
Figura 4.21. Representação do comportamento do deslocamento em um ensaio cíclico	95
Figura 4.22. Comportamento dos deslocamentos acumulados do Transdutor linear de posição resistivo (TLPR 2) posicionado no ponto de aplicação da carga	95
Figura 4.23. Desenvolvimento dos deslocamentos verticais mínimos em relação ao número de ciclos de aplicação de carga	96
Figura 4.24. Deslocamentos plásticos acumulados no ponto de aplicação da carga <i>versus</i> a derivada da função de deslocamentos plásticos	99
Figura 4.25. Deslocamentos máximos e mínimos (plásticos) acumulados no centro de aplicação de carga	99
Figura 4.26. Esquema representativo do posicionamento das células de tensão total	101
Figura 4.27. Desenvolvimento das tensões totais máximas aplicadas durante o ensaio	102
Figura 4.28. Percentual de redução da tensão aplicada em relação a CTT 04 e CTT 03.....	103
Figura 4.29. Desenvolvimento das tensões totais de acordo com a profundidade de leitura.	103
Figura 4.30. Simulação numérica no PLAXIS versão 7 do modelo físico: (a) deslocamento verticais e (b) tensões principais	106
Figura 4.31. Deslocamentos e tensões verticais do modelo físico	107
Figura 4.32. Deslocamentos e tensões verticais do modelo físico <i>versus</i> valores do Plaxis .	107
Figura 4.33. Verificação do ajuste dos deslocamentos verticais do modelo físico <i>versus</i> valores do Plaxis.....	109
Figura 4.34. Variação do módulo de resiliência <i>versus</i> variação da umidade de ensaio (TAKEDA, 2006).....	110
Figura 4.35. Ensaio de deformação permanente no RCD-R (modificado de Gómez, 2014).	111
Figura 4.36. Deslocamentos plásticos acumulados no ponto de aplicação da carga <i>versus</i> os deslocamentos plásticos da camada de base	112
Figura 4.37. Comparação do comportamento dos deslocamentos plásticos do modelo físico por duas funções.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Especificações para agregados reciclados de RCD para aplicações na pavimentação.....	13
Tabela 2.2. Levantamento bibliográfico de equipamentos de ensaio (PERKINS & ISMENK,1997 <i>apud.</i> KAKUDA, 2010).....	23
Tabela 2.3. Estrutura do pavimento das três estruturas de teste (Luo <i>et al.</i> , 2012).....	25
Tabela 2.4. Quadro resumo dos modelos empregados para à previsão da deformação permanente em solos granulares	32
Tabela 2.5. Quadro resumo dos modelos empregados para à previsão da deformação permanente em solos argilosos.....	33
Tabela 3.1. Caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70 (SOUZA <i>et al.</i> , 2012).....	37
Tabela 3.2. Caracterização do asfalto diluído do tipo CM-30 (Centro Oeste Asfaltos, 2012)	38
Tabela 3.3. Ensaio de caracterização básica do RCD.....	41
Tabela 3.4. Parâmetros dos materiais do pavimento.....	64
Tabela 4.1. Valores de coeficiente de curvatura e uniformidade	68
Tabela 4.2. Frações granulométricas do agregado reciclado	69
Tabela 4.3. Caracterização agregado reciclado (AR).....	70
Tabela 4.4. Valores de absorção e composição de diversos tipos de RCD.....	71
Tabela 4.5. Resultados de ISC para amostras compactadas na energia modificada (GÓMEZ, 2011).....	80
Tabela 4.6. Classificação MCT de um perfil de solo do campo experimental do PPG-UnB (modificado de MUÑETÓN, 2013)	83
Tabela 4.7. Caracterização básica do material destinado para a construção do subleito	83
Tabela 4.8. Tabela dos resultados de Índice de Suporte Califórnia do solo de subleito	85
Tabela 4.9. Caracterização do solo obtido até uma profundidade mínima de 1,0m	86
Tabela 4.10. Modelos de módulo de resiliência obtidos para os materiais de subleito e base. 88	
Tabela 4.11. Resultados dos controles de compactação do solo destinado para o subleito (1ª coleta)	89
Tabela 4.12. Resultados dos controles de compactação do resíduo destinado para a base.....	90
Tabela 4.13. Valores de ISC do material de subleito compactado na caixa experimental.....	90
Tabela 4.14. Análise estatística dos ISC para amostras de laboratório e campo	91
Tabela 4.15. Controle de compactação das camadas do modelo físico	91
Tabela 4.16. Características volumétricas e mecânicas do concreto asfáltico	93
Tabela 4.17. Valores da bacia de deslocamentos elásticos	100
Tabela 4.18. Valores máximos e mínimos de tensão totais para 100 mil ciclos	104
Tabela 4.19. Comportamento dos deslocamentos alternando as condições de contorno da camada de concreto asfáltico (CA)	105

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACOES.

%	Porcentagem
°C	Grau <i>Celsius</i>
°F	Grau <i>Fahrenheit</i>
$\Delta\omega_{\acute{o}tima}$	Variação da umidade em relação a umidade ótima
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AIMS	<i>Aggregate Imaging System</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo.
AR	Agregado reciclado
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
ASCOLES	Associação das Empresas de Coletores de Entulho de Obra e Similares de Brasília
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CC	Célula de carga
C_c	Coeficientes de curvatura
CCRDI	<i>Chongqing Communications Research & Design Institute</i>
CDW	<i>Construction and Demolition Waste</i>
cm	Centímetros
COBRAMSEG	Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente

CP	Corpo de prova
CREA-SP	Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado de São Paulo.
CTT	Células de tensão total
C_u	Coefficiente de uniformidade
D_{adm}	Deflexão admissível
DCP	Penetrômetros dinâmico de cone
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (extinto DNER)
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
D_p	Deflexão no ponto
E	Módulo de <i>Young</i>
<i>EDG</i>	<i>Electrical Density Gauge</i>
FA	Frasco de areia
<i>FWD</i>	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
G.C	Grau de compactação
GDF	Governo do Distrito Federal
h_{ac}	Espessura de da camada de concreto asfáltico
h_i	Espessura da i-ésima camada
HRB	<i>Highway Research Board</i>
Hz	<i>Hertz</i>
ID_P	Índices de abrasão Los Angeles e de degradação após a compactação Proctor
Infralab	Laboratório de Infraestrutura
IP	Índice de plasticidade
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
k_1, k_2 e k_3	Coefficientes de regressão

kg	Quilograma
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Trnasducers</i>
m	Metros
m ³	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEF	Método dos elementos finitos
mm	Milímetros
min	Minuto
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
MR _{óótima}	Módulo de Resiliência na umidade ótima
MTS	<i>Material Test System</i>
<i>N</i>	Número de solicitações de eixos equivalentes
<i>n</i>	Número total de camadas
NBR	Norma brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
ONG	Organizações não governamentais
ONU	Organizações das Nações Unidas
pa	Pressão atmosférica
PEL	Programa Entulho Limpo
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo

PPC	Peças de concreto pré-moldadas
PPG-UnB	Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB
R	Raio de curvatura
RBV	Relação betume vazios
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCD-R	Resíduos de Construção e Demolição Reciclados
RSU	Resíduos sólidos urbanos
RT	Resistência à tração por compressão diametral
Sinduscon-DF	Sindicato da construção Civil do Distrito Federal
SUCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
T	Temperatura da camada de concreto asfáltico em <i>fahrenheit</i>
TLPR	Transdutor Linear de Posição Resistivo
UFC	Universidade Federal do Ceará
UnB	Universidade de Brasília
UniCeub	Centro Universitário de Brasília
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i> - Coordenadas UTM
VAM	Volume de agregado mineral
VCB	Vazios com betume
Vv	Volume de vazios
Z	Profundidade
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo
γ_s	Peso específico das partículas sólidas
$\delta_{p\ total}$	Deformação total sob uma carga P
ϵ_p	Deformação específica plástica
$\epsilon_{p(i)}$	Deformação plástica média da i-ésima camada

ε_r	Deformação resiliente
ε_t	Deformação tangencial
ε_v	Deformação elástica (ou resiliente) vertical
θ	Tensão volumétrica
μ	Coefficiente de Poisson
ρ	Massa específica total
ρ_d	Massa específica seca
ρ_{LAB}	Massa específica medida em laboratório
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão confinante no ensaio triaxial cíclico ou Tensão principal menor
σ_d	Tensão desvio no ensaio triaxial cíclico
σ_z	Tensão vertical
τ_{oct}	Tensão de cisalhamento octaédrica
ω	Umidade do material
ω_L	Umidade de limite liquidez
$\omega_{ótima}$	Umidade ótima
ω_p	Umidade de limite plasticidade

CAPÍTULO 1

Introdução

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em muitos setores produtivos da sociedade os recursos naturais são explorados de forma exaustiva para coexistência humana, essa demanda por recursos naturais promove de forma direta ou indireta a degradação do meio ambiente e a geração de resíduos. Subproduto de toda produção e/ou ação humana, o resíduo, contribui de maneira passiva para a geração de problemas ambientais e de saúde pública. Dessa maneira, fica clara a necessidade de medidas mitigadoras, políticas e técnicas para a gestão de qualquer subproduto desta natureza, desde sua produção ao seu destino final.

Muitas dessas medidas, políticas e técnicas foram estabelecidas em congressos, conferências e organizações para a conservação e a proteção ambiental, promovidos pelas Organizações das Nações Unidas (ONU), que se intensificaram após a Segunda Guerra Mundial e contribuíram para com o florescimento do movimento ambientalista em todo mundo. No final da década de 1970, os líderes políticos começaram a perceber que crises ambientais assolavam todas as regiões do planeta, afetando tanto os países menos desenvolvidos como as nações industrializadas, independentemente do tamanho de suas populações. Como divisor de águas para os movimentos ambientalistas, a conferência de Estocolmo em 1972, na Suécia, veio como a primeira conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano (*UN Conference on the Human Environment*), sendo ponto de partida para outras conferências internacionais que se seguiram (KEELER & BURKER, 2010).

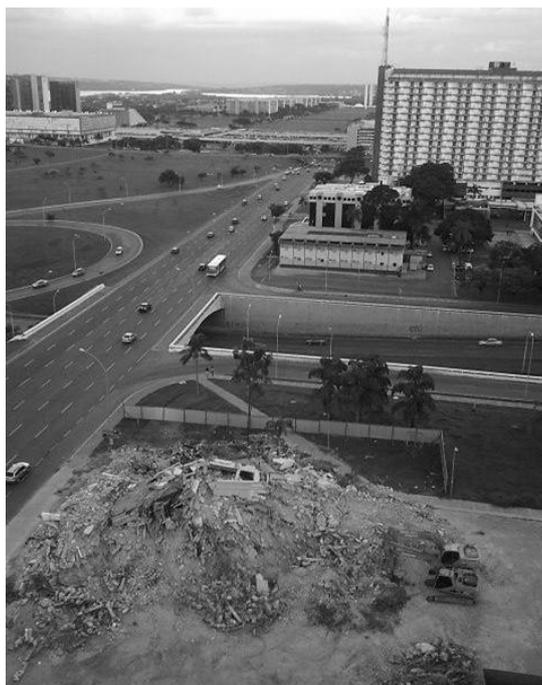
O setor da construção civil só veio ganhar ênfase quanto à importância da conscientização no que se referem a construções sustentáveis em conferências internacionais anos após a realizada em Estocolmo em 1972. Dentre as conferências que a seguiram pode-se citar a Conferência de Genebra em 1984, a realizada no Rio de Janeiro em 1992 e a Rio+10 realizada em Joanesburgo, na África do Sul em 2002. Na primeira, foi estabelecida a definição de desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender às

suas próprias necessidades”; na segunda conferência citada, realizada no Brasil no ano de 1992, na cidade do Rio de Janeiro, foram produzidos cinco relatórios dentre os quais se destaca, para indústria da construção civil, a Agenda 21 que estabeleceu objetivos, planos de ação e estratégias de implantação detalhados para sustentabilidade ambiental e desenvolvimentista que, futuramente, já na terceira conferência (quarta conferência derivada da Conferência de Estocolmo de 1972) em Johannesburgo, e ratificada pela cúpula de diversos países, veio abordar a necessidade de aprimorar o processo de construção nos países em desenvolvimento, formulando novas tecnologias da construção para preservação dos recursos, operações com consumo de energia eficiente, conservação de água e práticas responsáveis de gestão de recursos hídricos. Além disso, foram abordados os problemas da habitação sustentável e da justiça social tanto rural como urbana.

As ações desenvolvidas e estabelecidas nessas conferências contribuíram para melhores práticas internacionais em termos de construção sustentável. No entanto, a urbanização acelerada, o crescimento da frota de veículos, a mudança das concepções arquitetônicas e o rápido adensamento das cidades de médios e grandes portes têm provocado inúmeros problemas para a destinação do grande volume de resíduos gerados em atividades de construção, renovação e demolição de edificações e infraestrutura urbanas (PINTO, s.d.; MOTTA & FERNANDES, 2003).

Assim, se estabelece que todo evento ou atividade, seja de ordem econômica ou social, que venha a acionar o setor de infraestrutura de um país pode contribuir para o aumento da produção de resíduos. O Brasil não foge a esta assertiva, atualmente o país vive um cenário econômico crescente, principalmente impulsionado pelo setor da construção civil que passa por bons momentos, em particular, com a vinda dos dois eventos mundiais mais expressivos, a copa do mundo em 2014 e os jogos olímpicos de 2016.

A situação econômica do Brasil (sétima economia do mundo) cria um reflexo direto na produção dos resíduos, pois permite à sociedade um maior acesso a bens de consumo que estão ligados direta ou indiretamente à cadeia da construção civil e, consecutivamente, à geração de resíduos. A tradução da ideia anteriormente colocada pode ser visualizada na Figura 1.1 na qual está representada a pilha de entulho resultante da demolição de um hotel em Brasília para a reconstrução de um novo hotel de maior porte para o advento da copa do mundo de 2014.



(Data da Imagem: Novembro de 2011)

Figura 1.1. Pilha de entulho resultante da demolição de hotel em Brasília – DF.

Seja para reconstrução de cidades dizimadas por guerras ou para construção de estádios e/ou novas moradias, o setor da construção civil é apontado por inúmeras pesquisas como responsável pela origem dos resíduos (BRAGA *et al.* (2008); RIBEIRO & REZENDE (2006); RIBEIRO *et al.* (2002); LEITE *et al.* (2007); MACEDO *et al.* (2008); BARBOSA *et al.* (2008); ABDON & BERNUCCI (s.d.)).

John (2000) coloca que o setor da construção civil é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia, uma vez que produz os bens de maiores dimensões físicas do planeta. Estima-se que os resíduos da construção civil representam de 40% a 70% do total em peso de resíduos gerados em áreas urbanas (MOTTA & FERNANDES, 2003; SILVA *et al.*, 2006; FROTA *et al.*, 2003; MOREIRA *et al.*, 2006; FROTA *et al.*, 2005; RESPLANDES & REZENDE, 2007). Ligado a estes dados de geração do resíduo de construção e demolição (RCD) está o índice de perda que varia entre 20% e 30% em sistemas convencionais.

Para quantificar melhor a problemática da geração de resíduos de construção civil no Brasil, Medeiros Jr. *et al.* (2010) e Delongui *et al.* (2010) estimam que a construção civil gera uma média cerca de 265-630 kg/hab.ano, enquanto que as estimativas internacionais mostram uma variação de 130-3000 kg/hab.ano. Essas estimativas de geração de resíduos apresentam um cenário de preocupação quanto ao impacto ao meio ambiente e, em especial no sistema de saneamento em áreas urbanas que sofrem com problemas devido à incorreta disposição e manejo dos resíduos. Tais problemas podem ser enumerados como: obstrução de elementos

de drenagem urbana, o que provoca risco de enchentes; assoreamento e poluição de rios, lagoas e outros mananciais; poluição visual da cidade; aumento do número de espécies indesejáveis e prejudiciais à saúde humana, como ratos e baratas; gastos excessivos com a extração de recursos naturais e o seu possível esgotamento; assim como custos adicionais oriundos do desperdício de material (MEDEIROS Jr. *et al.*, 2010; DELONGUI *et al.*, 2010; MACEDO & LAFAYETTE, 2010; ARAÚJO Jr. *et al.*, 2010).

Diante do cenário de falta de gestão no manejo e disposição de resíduos, como ressalta Goldenstein (2003), a construção civil deve trazer soluções para gestão de seus resíduos, os denominados RCD – Resíduos de Construção e Demolição, garantindo ganhos sociais e financeiros. Além dos resíduos tradicionais, como indicado por Santos (2007) e Santos *et al.* (2008), os resíduos resultantes da preparação e escavação de terrenos também são definidos como RCD pela resolução nº 307/2002 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). Dessa forma, a quantidade de solo presente nos volumes tratados nas usinas de reciclagem pode atingir valores expressivos. Justifica-se, assim, o direcionamento de esforços em busca da aplicação dos RCD em obras geotécnicas.

Segundo Hendriks *et al.* (2007), a partir de pesquisas e experiências em um grande número de projetos, o concreto triturado e outros tipos de resíduos do entulho têm se tornado totalmente aceitáveis como material de sub-base. Logo, dentre essas obras, a que se destaca para o uso do RCD é a pavimentação por consumir um grande volume de material de jazidas de solos e de agregado extraídos de pedreiras naturais, conforme se vê na Figura 1.2, na qual se observa que este setor é responsável por cerca de 18,37% do consumo de rocha britada do país.

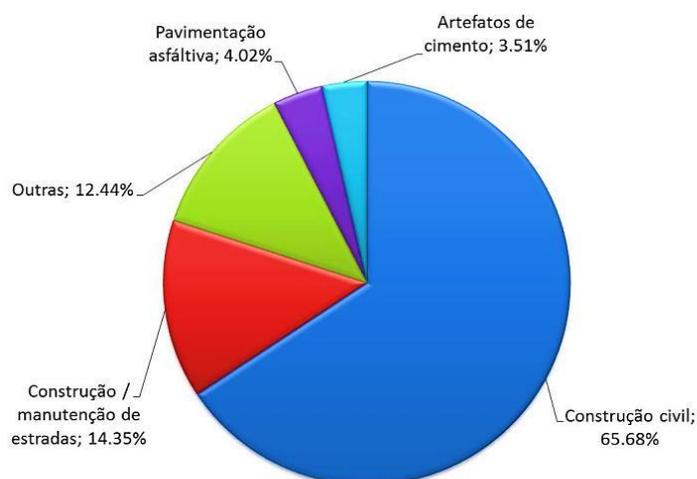


Figura 1.2. Percentual de consumo setorial de rocha britada – 2007 (DNPM, 2009)

1.1 HISTÓRICO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADO (RCD-R) EM OBRAS GEOTÉCNICAS

Na pavimentação rodoviária brasileira, a maior parte da bibliografia aqui já citada reporta que a aplicação de RCD em camadas do pavimento iniciou no final da década de 80. Balzan *et al.* (2003) complementam, em seu histórico, que um dos artigos pioneiros foi o trabalho técnico “*Utilização de entulho da construção civil reciclado na pavimentação urbana*”, publicado em 1995 durante a 29.^a Reunião Anual de Pavimentação, ocorrida em Cuiabá/MT. Analisando esses registros, observa-se que o uso do RCD, na pavimentação brasileira, é relativamente novo, cerca de 20 anos, tendo iniciado na década de 90 as primeiras atividades nesse setor, com o registro de instalação, em São Paulo, de uma usina de britagem em 1991. Por falta de normas técnicas, o emprego desse material em pavimentação ficou impossibilitado durante alguns anos, tendo sido utilizado na fabricação de blocos para alvenaria (MOREIRA *et al.*, 2006).

O uso de materiais provenientes de RCD faz-se necessária a validação e a comprovação do desempenho a partir de normas técnicas. Dessa maneira, visando preencher a lacuna quanto à normalização do material e procurando solucionar os problemas causados pelo grande volume de resíduos sólidos da construção civil gerados nas cidades, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão vinculado ao Ministério das cidades, estabeleceu por meio da Resolução nº 307, de julho de 2002, que os municípios e o Distrito Federal (DF) devem elaborar um plano integrado de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil com o objetivo de cessar a disposição de resíduos em aterros de resíduos domiciliares e em áreas de bota-fora (OLIVEIRA *et al.*, 2005; VASCONCELOS *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2008a; LEITE *et al.*, 2006).

A resolução (CONAMA, 2002) especifica que resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de resíduos sólidos da construção civil, chamados popularmente de entulho de obra, são os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições que contém tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rocha, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, entre outros, que são classificados como classe “A”. Deve ser evitada a presença de materiais classificados como classe “B”, “C” tais como: solos, madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes, e de “contaminantes” ou “indesejáveis” denominados como classe “D”.

Fundamentada na resolução CONAMA nº 307, a prefeitura municipal de São Paulo (PMSP) e a comunidade técnica ligada ao setor de construção civil conceberam a primeira

norma brasileira aplicada para especificação quanto ao uso de agregados reciclados em camadas de pavimentos, intitulada: PMSP/SP ETS – 001/2003 - “Especificação Técnica de Serviço para Camadas de Reforço do subleito, Sub-base e Base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil”. Posteriormente, em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou um conjunto de normas que especificam o uso do RCD, como na ABNT NBR15112 (2004a), NBR15113 (2004b), NBR15114 (2004c), NBR15115 (2004d) e NBR15116 (2004e). Dentre as normas citadas, a ABNT NBR 15115 (2004), cujo título é “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos”, estabeleceu o meio legal para regulamentação e estímulo para o emprego do agregado reciclado em obras de pavimentação. Com isso, o município de São Paulo elaborou decreto N° 48.075, de 28 de dezembro de 2006, que obriga a utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do município de São Paulo.

Souza (2010) cita como indicativo da repercussão, a partir da criação das normas (Resolução nº307 e NBR 15115), a evolução indicada na Figura 1.3, na qual, se verifica o crescimento do número de trabalhos sobre o uso do RCD em obras geotécnicas, publicados no Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG entre os anos de 1998 e 2012.

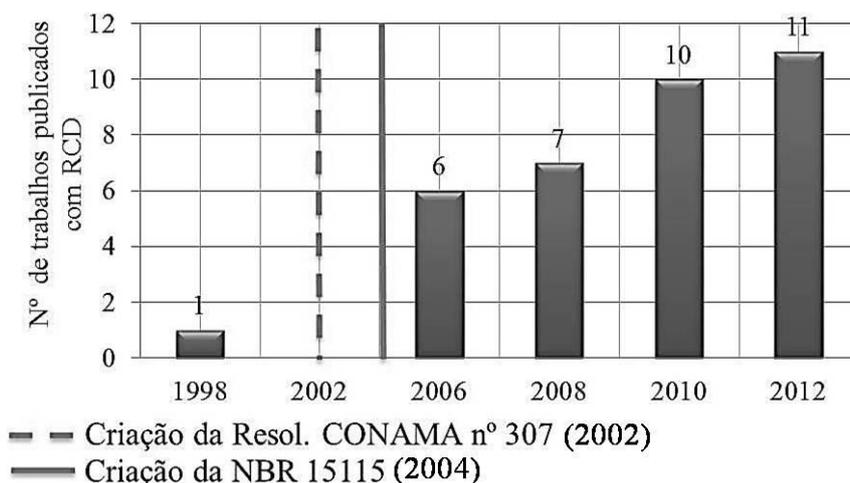


Figura 1.3. Número de trabalhos publicados nos COBRAMSEG entre 1998-2012 com RCD aplicados a obras geotécnicas (SOUZA, 2010)

Na Figura 1.3 pode-se observar que a tendência para uso racional e sustentável dos resíduos da construção civil é promissora, sendo assim, vale ressaltar que novas pesquisas

fora do setor da pavimentação vêm sendo conduzidas sobre o uso de RCD como: coberturas e sistemas de drenagem de aterros de resíduos (BARBOSA *et al.*, 2008); estacas de compactação para melhoramento de solos (ARAÚJO Jr. *et al.*, 2010); agregado graúdo em estaca de compactação (MEDEIROS Jr. *et al.*, 2010); e material de aterro em muros reforçados com geossintéticos (PALMEIRA, 2010).

Então, esta pesquisa busca, junto ao meio técnico e acadêmico, uma forma mais racional e sustentável do uso de materiais alternativos, no caso específico RCD, para a aplicação em obras de pavimentação, seja como reforço do subleito, sub-bases, e revestimento e principalmente, como bases de vias com volume de tráfego baixo a moderado ou até mesmo intenso.

1.2 SITUAÇÃO DO RCD-R NO DISTRITO FEDERAL

No Brasil, a região do Distrito Federal é conhecida nacionalmente pela carência de materiais adequados para a estrutura do pavimento, as jazidas de cascalho, tradicionalmente utilizadas, como material de base rodoviária, encontram-se exauridas na sua grande maioria. Há também insuficiência de britas de qualidade que possam ser utilizadas como agregados para as camadas de base, sub-base ou para as misturas asfálticas dos revestimentos (FARIAS, 2009).

Por sua vez, números estimados pela Associação das Empresas de Coletores de Entulho de Obra e Similares de Brasília (ASCOLES) demonstram que 70% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Distrito Federal (DF) são constituídos por RCD o que perfaz, segundo Farias (2009) e Gómez (2011), um total de 6000 toneladas por dia ou o equivalente a uma produção anual de 2,2 milhões de ton/ano.

Salvo algumas iniciativas privadas que vêm recentemente beneficiando o RCD gerado no DF, a grande maioria do RCD gerado não tem um destino nobre ou tecnicamente adequado no ponto de vista da engenharia. Geralmente, o RCD é depositado sem controle no aterro do Jóquei ou “Lixão da Estrutural” (projetado para receber todo resíduo produzido no DF) onde é basicamente utilizado para cobertura final das células do aterro como ilustra a Figura 1.4.

Rocha (2006), em sua pesquisa, constatou a deposição irregular do RCD produzido no DF no aterro do Jóquei; o mesmo, observou a presença de uma mini usina de beneficiamento do RCD no local. Contudo, além de estar operando de forma precária (até dias atuais), a mini usina de reciclagem somente permitia a obtenção de agregado reciclado o qual continua de

uso frequente para melhoria das vias de acesso e executar algumas camadas de cobertura no próprio aterro (Figura 1.4).



(Data da Imagem: Julho de 2011)

Figura 1.4. Conformação da parte superior da célula do aterro com a utilização de RCD.

No evento “*Caminhos da Reciclagem no Distrito Federal*” realizado em setembro de 2010, a ASCOLES expôs que em um período de 15 anos muitos documentos foram enviados aos diversos setores do Governo do Distrito Federal (GDF), propondo ações que viabilizassem uma destinação racional para os entulhos, que fosse compatível com as atividades empresariais e com as necessidades ambientais. Além de levar estas ideias a público, a ASCOLES apresentou à sociedade uma usina móvel de processamento de resíduos.

Organizações não governamentais, como a ONG Eco Atitude, situada em Brasília, vêm promovendo ações sustentáveis dentre as quais se destaca o PEL (Programa Entulho Limpo) que busca ações ambientais em parceria com a Universidade de Brasília (UnB) e o Sinduscon-DF. O PEL está sendo divulgado em âmbito nacional por meio de palestras, vídeos, reportagens e distribuição de uma cartilha que apresenta uma forma racional de tratar os resíduos gerados nos canteiros de obra.

Somando-se a estas ações, o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília vêm conduzindo trabalhos que visam à utilização de materiais alternativos, como o RCD, na construção das estruturas do pavimento, como os trabalhos de Góngora (2011) e Gómez (2011), nos quais as autoras buscaram avaliar o uso do RCD como material de aterro de estradas não pavimentadas mediante ensaios de carregamento cíclico e como material para construção de bases rodoviárias, respectivamente.

1.3 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O rápido processo de urbanização que ocorre em todo o globo terrestre está ligado na extração de recursos naturais não renováveis e na geração de resíduos, o que atinge diretamente nas questões ambientais. As pesquisas acadêmicas não se atêm apenas em gerar conhecimento para soluções sustentáveis para a redução do consumo acelerado de recursos minerais não renováveis, mas também em apresentar soluções técnicas de utilização desses resíduos gerados. A avaliação do uso de resíduos de construção civil e demolição conduzem para criação de uma base sólida para a efetiva promoção do resíduo triturado como agregado, o denominado agregado reciclado. Sendo necessárias mais pesquisas sobre o desempenho do resíduo triturado como agregado, juntamente com informações idôneas e com certificação de qualidade desse material.

1.4 OBJETIVO DA PESQUISA

Esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico de um agregado reciclado de RCD utilizado como material de base de um pavimento flexível, por meio de um modelo físico, ou seja, modelo de verdadeira grandeza, que simulou, em condições laboratoriais, o comportamento de um pavimento flexível submetido a carregamentos cíclicos em condições próximas as aplicadas em campo.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos pretendidos por esta pesquisa estão: a avaliação do desempenho do RCD como material de base por um modelo físico; e a retroanálise do comportamento do modelo físico.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Por ser uma estrutura constituída por materiais provenientes de reservas naturais esgotáveis, o meio técnico enfrenta desafios que em sua grande parte são oriundos das novas e rígidas regulamentações ambientais, sejam por novas exigências de extração mineral ou de destinação de resíduos de construção e demolição - RCD.

De maneira a compensar a extração exaustiva dos recursos minerais e garantir uma solução sustentável para o destino do RCD, esta pesquisa propõe o uso desse material na estrutura do pavimento, mais especificadamente na camada de base. Assim, camadas como de rolamento, base, sub-base e reforço do subleito, antes construídas com agregados provenientes de jazidas naturais, serão construídas com agregados reciclados dos entulhos da construção civil. Com isso, a seguir é feito um breve resumo dos materiais e aspectos mais relevantes para este trabalho.

2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – RCD

➤ Definição

A Resolução CONAMA nº 307 de 2002 define os resíduos da construção civil como sendo [...] *os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas,*

madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

Quando este entulho de obra é destinado para obras de pavimentação (para a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista) começa a apresentar algumas restrições de uso que o definem como os provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições de obras de construção civil, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rocha, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, etc., devendo ser evitada a presença de solos, madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes (PMSP/SP. ETS-001, 2003).

Ao observar as definições de RCD é fácil notar que se trata de um material com composição bastante heterogênea que depende diretamente da fonte geradora do resíduo. Contudo, é possível inferir uma composição média como é indicado na Figura 2.1, segundo as quatro classes definidas pela Resolução nº 307 do CONAMA.

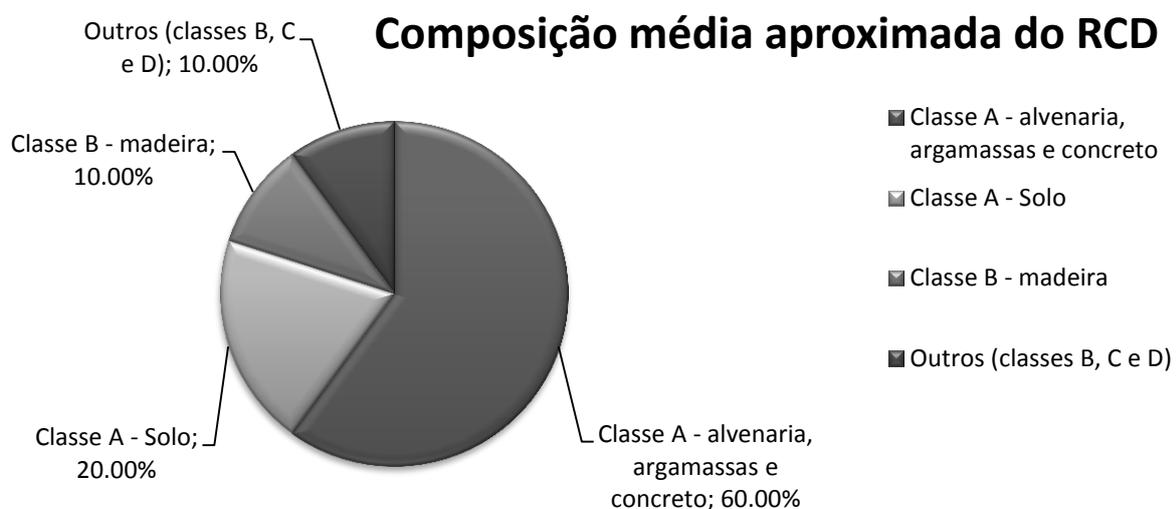


Figura 2.1. Composição média aproximada do RCD (CREA-SP, 2005)

➤ Classificação

A Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) por meio da NBR 10004 (2004f) apresenta as classificações dos resíduos sólidos. Para a pesquisa em questão, segundo a NBR 10004 (2004f), os resíduos da construção civil “*próprios para uso*” estariam classificados

como *Resíduos Classe II B Inertes*, para melhor entendimento pode-se classificar o resíduo da seguinte forma:

- **Classe I Perigosos:** são aqueles que, em função de suas propriedades físicas, químicas e infectocontagiosas, podem apresentar periculosidade real ou potencial à saúde pública ou ao meio ambiente. Os resíduos desta classe são característicos por serem ainda inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos;
- **Classe II Não perigosos:**
 - **Classe II A Não inertes:** são aqueles que não se enquadram nas classes I e II B;
 - **Classe II B Inertes:** são aqueles que, ensaiados segundo o teste de solubilidade da Norma NBR 10006 (2004g) não apresentam concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões de cor, turbidez, sabor e aspecto.

Ao contrário da NBR 10004 (2004f) que classifica de forma geral qualquer resíduo sólido a Resolução nº 307 do CONAMA classifica os resíduos da construção civil da seguinte forma:

Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Vale ressaltar que a partir de 16 de agosto de 2004 a Resolução nº 348 do CONAMA retifica o artigo 3º, item IV, da Resolução CONAMA nº 307, onde passa incluir o amianto na classe de resíduos perigosos (Classe D).

2.2 ESPECIFICAÇÕES DAS NORMAS APLICADAS AO USO DE RCD PARA PAVIMENTAÇÃO

No que se refere ao tema de pavimentação existem basicamente duas normas: a PMSP/SP – 001 de 2003, primeira norma brasileira desenvolvida para essa finalidade; e a norma ABNT NBR 15115 de 2004 que especifica a utilização de agregado reciclado de RCD em camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos. Limites e exigências de ambas as normas supracitadas, para utilização do RCD, podem ser observadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1. Especificações para agregados reciclados de RCD para aplicações na pavimentação

<i>Parâmetros</i>	<i>PMSP/SP ETS-001 (2003)</i>	<i>NBR 15115 (2004d)</i>
Dimensão Máxima características (mm)	50,0	63,5
Passante na peneira 0,42mm (%)	$10 \leq a \leq 30$	$10 \leq a \leq 40$
Coefficiente de Uniformidade	≥ 10	≥ 10
Coefficiente de Curvatura	$1 \leq a \leq 3$	não consta
Porcentagem de materiais indesejáveis	mesmo grupo	não consta
	grupos distintos	não consta
Forma dos grãos (% de grãos lamelares)	não consta	máximo 30%
Índice de suporte Califórnia (%)	base	$\geq 60^{(b)}$
	sub-base	≥ 20
	Ref. de subleito	≥ 12
Expansão (%)	base	$\leq 0,5$
	sub-base	$\leq 1,0$
	Ref. de subleito	$\leq 1,0$

^(a) É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo-padrão de 80 kN no período do projeto

^(b) É permitido o uso de agregado reciclado em camada de base para vias de tráfego com $N \leq 10^5$ repetições do eixo-padrão de 80 kN no período do projeto

2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO APLICADO À PAVIMENTAÇÃO

Segundo Motta (2005), no Brasil as primeiras experiências que remetem ao uso de agregados reciclados em pavimentação datam de meados da década de 80, desde então, pesquisas sobre o tema vêm sendo realizadas, visto a necessidade de se procurar novas técnicas e materiais no setor de infraestrutura rodoviária, uma vez que o país possui somente cerca de 12% de suas rodovias em condição pavimentada.

Poon e Chan (2006) *apud* Leite (2007) complementa que nas duas últimas décadas tem sido provada a viabilidade do uso dos RCD, após a sua reciclagem, em camadas de base e sub-base de pavimentos, uma vez que o estímulo e o desenvolvimento de técnicas para a reciclagem de RCD como material de pavimentação veem dos altos custos e a grande demanda de materiais virgens. Nos Estados Unidos, por exemplo, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil apresenta custo inferior em torno de 30%, comparado com a brita graduada simples, esta economia significativa tem incentivado muitos órgãos e construtoras a substituir, quando possível, o material natural pelo reciclado (BLANKENAGEL & GUTHRIE, 2006).

Recentemente, merecem atenção os trabalhos de Fernandes (2004), Motta (2005), Oliveira (2007), Leite (2007), Amorim (2013), Quiñones (2014) e Lourenço (2015) os quais realizaram pesquisas sobre o uso de agregados reciclados de resíduos da construção civil em pavimentação. Fernandes (2004) realizou uma análise de caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) dos Municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte, visando sua aplicação em bases, sub-base e reforços de subleito de pavimentos rodoviários urbanos e rurais. O agregado reciclado proveniente da usina do Rio de Janeiro consistiu em um material tipo misto nas frações de britas 0 e 1, pedrisco e pó-de-pedra. Já a usina de Belo Horizonte cedeu os agregados reciclados em forma de brita corrida dos tipos misto e concreto. Foram também realizados ensaios comuns à caracterização de agregados convencionais (caracterização física como granulometria, abrasão *Los Angeles* e índice de forma), bem como aqueles de enfoque ambiental, enquanto que para caracterização mecânica do material executou-se ensaios para determinação do módulo de resiliência. Como afirma o autor, os resultados apresentados na pesquisa corroboram para a comprovação das viabilidades técnica, econômica, social e ecológica do emprego destes materiais em pavimentação.

Motta (2005) efetuou análises laboratoriais em agregados reciclados da cidade de São Paulo para a validação do seu uso em camadas de base, sub-base ou reforço do subleito de pavimento, em substituição aos materiais convencionais, com enfoque em vias urbanas de baixo volume de tráfego. O estudo envolveu a análise do agregado reciclado *in natura*, além de sua mistura com 4% de cal ou 4% de cimento Portland, como forma de promover um aumento da resistência do material. A autora observou que o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil tem uma utilização promissora como insumo na construção de bases, sub-bases e reforços do subleito de vias de baixo volume de tráfego, em substituição aos materiais convencionais. No entanto, Motta (2005), recomenda atenção para alguns aspectos como a necessidade de se focar todo o sistema de produção do agregado reciclado, de forma a torná-lo o mais homogêneo possível. Além disso, devem-se realizar ensaios de caracterização do material e assegurar as condições de projeto, tanto na fase de execução como na de controle de obra; por se tratarem de materiais com características que diferem substancialmente dos materiais tradicionais é recomendado que não se negligencie esta premissa básica de estar se analisando materiais distintos, logo há a necessidade de aperfeiçoar as técnicas de avaliação ou caracterização de materiais alternativos.

Oliveira (2007) procurou a existência de indicativos positivos para utilização de agregados reciclados em pavimentos flexíveis. O autor executou duas análises: uma por meios laboratoriais e outra via estudos de campo por meio de uma pista experimental na qual se aplicou agregados reciclados na sua base e sub-base. O material foi proveniente de duas amostras de resíduos sólidos do município de Goiânia – Goiás, uma constituída de resíduos de concreto e a outra de resíduos cerâmicos. Dentre as avaliações feitas em laboratório pode-se destacar a: [...] *constituição dos grãos dos agregados reciclados, identificada por análise visual e pelo pH, que também indica a possibilidade de ganho de resistência com o tempo; a textura final das dosagens; a porosidade interna dos grãos dos agregados reciclados e a porosidade interagregados, que participa efetivamente do comportamento das dosagens; a resistência dos grãos, determinada pelos índices de abrasão Los Angeles e de degradação após a compactação Proctor - ID_P e os parâmetros de índice de suporte Califórnia e módulo de resiliência, que apresentam valores semelhantes aos de materiais naturais, tradicionalmente utilizados.*

No final de 2003, para os estudos de campo, Oliveira (2003) acompanhou a construção da pista experimental com 56 metros de comprimento, sendo as camadas de base e sub-base compostas por dosagens de agregados reciclados mistos e solo argiloso local. Na pista foram

realizados ensaios de campo como: viga *Benkelman*, provas de carga sobre placa, penetrômetros dinâmico de cone (DCP) e Panda, e pressiômetro *Pencil* e *geogauge*. Com resultados desse conjunto de ensaios executados na pista experimental o autor comprovou que há bons indicadores de desempenho do pavimento confeccionado por resíduos de construção civil.

Leite (2007), assim como Oliveira (2007), realizou ensaios de laboratório e campo para analisar o comportamento mecânico do agregado reciclado para emprego em camadas de base e sub-base. A pesquisa consistiu em ensaios laboratoriais, acompanhados de um estudo de caso – o pavimento do novo campus da Universidade de São Paulo (USP Leste). Um trecho de 1.020 metros de extensão foi utilizado na pesquisa, de um total de aproximadamente dois quilômetros de vias pavimentadas no campus da USP.

Aspecto diferente da pesquisa de Leite (2007) para a de Oliveira (2007) foi que na primeira pesquisa a autora realizou trechos experimentais com quatro seções-tipo diferentes, variando os materiais, as espessuras, a compactação e o subleito. Os ensaios de campo compreenderam: controle de materiais e de execução, resistência à penetração pelo penetrômetros dinâmico de cone e levantamento deflectométrico com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Por fim, como resultado foi constatado que o comportamento mecânico do agregado reciclado apresenta uma forte dependência da eficiência da compactação. Quando submetido a uma compactação adequada, o material reciclado comporta-se tal qual uma brita graduada simples.

Amorim (2013) analisou a viabilidade do aproveitamento do RCD em obras viárias quando empregado em camada de base. Para isso, o autor associou o RCD a um solo laterítico de Campo Verde – Mato Grosso, e verificou o desempenho do material, por meio, de ensaios laboratoriais e de campo. Em conclusão, Amorim (2013), verificou que o incremento do RCD ao solo elevou a resistência à compressão simples e o módulo de resiliência de modo a produzir um material de maior resistência. Para as deflexões obtidas no trecho experimental em estudo, calculadas através de leituras realizadas com o auxílio da viga *Benkelman*, observou-se valores dentro dos limites aceitáveis para o tráfego atuante.

Por fim, Quiñones (2014) e Lourenço (2015) em suas pesquisas avaliaram uso do agregado reciclado de RCD em misturas asfálticas usinadas a quente, onde a principal diferença entre as pesquisas se encontra no ligante utilizado, uma vez que Quiñones (2014) fez o uso de um asfalto-borracha e um CAP 50/70, enquanto Lourenço (2015) elaborou misturas asfálticas apenas com um CAP 50/70. Em ambas as pesquisas foram observadas, um

bom comportamento mecânico e físico do concreto asfáltico, porém, se observou o aumento do consumo do ligante devido à alta absorção do agregado reciclado. Contudo, na pesquisa de Quiñones (2014) o uso do asfalto-borracha contribuiu para redução da quebra do agregado reciclado.

2.4 MODELOS EXPERIMENTAIS DE GRANDE ESCALA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

As pesquisas até aqui apresentadas demonstram que, seja por meio de ensaios laboratoriais ou avaliações de campo, o resíduo de construção apresenta um bom desempenho como material para a construção de pavimentos rodoviários. Assim, de maneira a somar novos conhecimentos, pesquisas são conduzidas em modelos experimentais de grande escala, de forma a simular estruturas de pavimento com dimensões iguais às condições reais: de modo mais controlado, com menor investimento e com menor influência das condições ambientais.

Silva (2009a) lista aspectos como: a oscilação do lençol freático; a variabilidade do tráfego; o monitoramento da umidade e temperatura do ar; os custos de manter equipamentos e equipe de medição em campo por períodos prolongados; proteção dos equipamentos de medição e de comunicação remota contra vandalismo; carência de informações precisas das obras existentes, tais como espessuras e materiais empregados nas rodovias. Esses aspectos são dificuldades inerentes ao estudo em campo e acabam influenciando nos resultados, logo, o autor justifica o quanto é interessante uma abordagem por meio de ensaios em verdadeira grandeza por meio de condições controladas de laboratório, o que minimiza ou anula completamente estes aspectos.

Estudos com modelos físicos de verdadeira grandeza vêm sendo utilizados para avaliar vários arranjos de estruturas de pavimento com a utilização de materiais de construção tradicionais, ou alternativos, ou com materiais reforçados com geossintéticos. Essa linha de estudo por meio de modelos de verdadeira grandeza em nível laboratorial vem aumentando recentemente no Brasil a exemplo das pesquisas de Antunes (2008), Silva (2009a), Kakuda (2010). Vale ressaltar, inicialmente, que a pesquisa realizada por Antunes (2008) foi a pesquisa que influenciou o trabalho atual do ponto de vista dos procedimentos metodológicos e no que tange o equipamento (caixa metálica de ensaio de dimensões de 1,6 m x 1,6 m e altura de 1,2 m) que é o mesmo da pesquisa atual (Figura 2.2).

No entanto, Antunes (2008), procurou avaliar o comportamento mecânico de uma estrutura de pavimento sem revestimento composta por duas camadas: uma base de brita graduada simples, calcária, proveniente da região de Goiânia/GO e uma camada de subleito composta por um solo fino laterítico proveniente da região de Goiânia/GO, com características colapsíveis e porosas muito semelhantes aos solos encontrados na região do Distrito Federal.

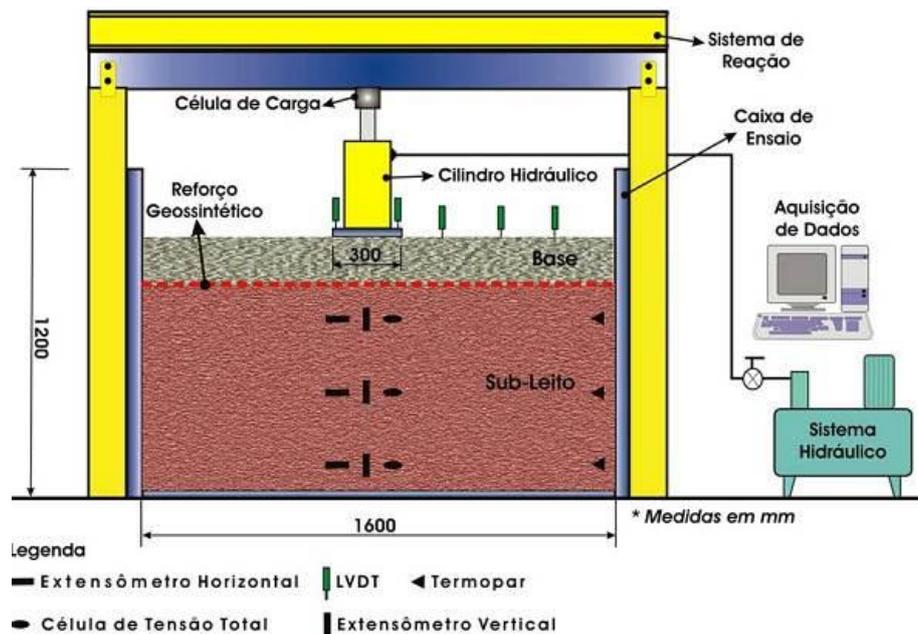


Figura 2.2. Esquema geral do equipamento de carregamento cíclico de grande escala (ANTUNES, 2008)

Antunes (2008) também efetuou uma avaliação comparativa entre estruturas sem e com a base reforçada pela adoção de geossintéticos. A partir dos dados da instrumentação implantada no modelo e de um critério de parada para o ensaio, o autor obteve conclusões interessantes como: os ensaios reforçados apresentaram vidas úteis de 9,2 e 2,8 vezes superiores ao ensaio sem reforço.

Silva (2009a) efetuou avaliações do comportamento de três estruturas de pavimento em um tanque de ensaio de dimensões iguais a 2,0 x 2,0 x 1,8 m (Figura 2.3). A diferença entre as três estruturas se fez a partir da mudança do tipo da camada de revestimento, que foi elaborada com um concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), a outra com peças de concreto pré-moldadas (PPC) e uma estrutura sem revestimento, ou seja, a estrutura do pavimento até a camada de base. Para as estruturas o autor fez variar o lençol freático na

estrutura e procurou avaliar, como principal objetivo principal, a influência no deslocamento elástico total do pavimento para os diversos níveis de equilíbrio do lençol freático.

Por meio do tanque-teste o autor validou em laboratório a ação deletéria da água no pavimento que refletiu nos maiores deslocamentos elásticos encontrados para as condições mais críticas do lençol freático (exemplo: subleito inundado), além, também de verificar qual pavimento flexível desempenhou melhor controle na transmissão de tensões para a estrutura do pavimento.

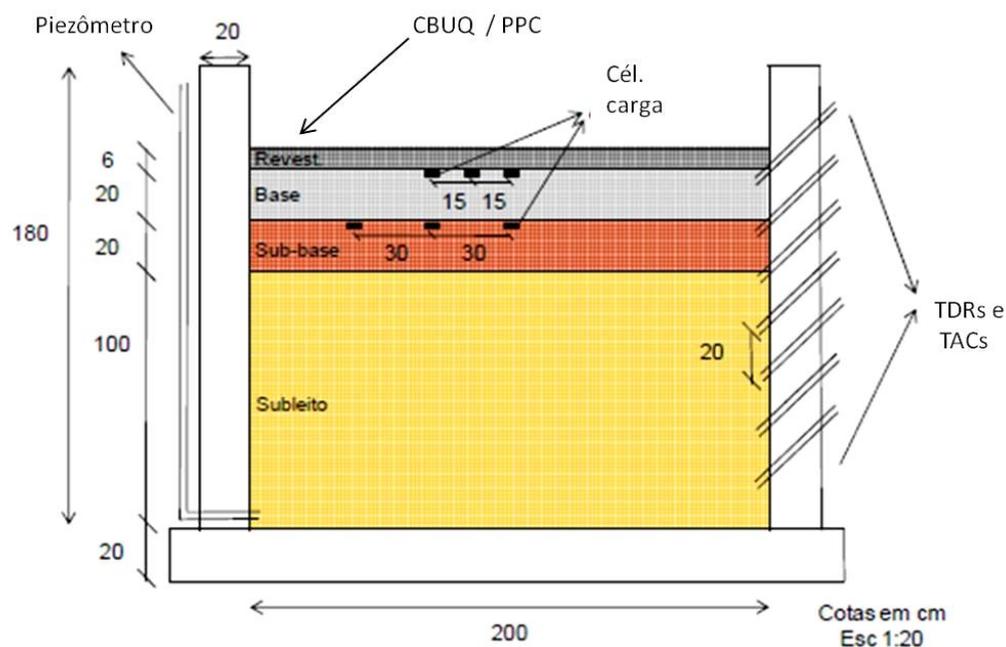


Figura 2.3. Esquema do tanque teste utilizado por Silva (2009a) (Adaptado de SILVA, 2009a)

Kakuda (2010) em sua pesquisa desenvolveu um modelo físico em laboratório (de dimensões de 1,5 x 1,5 x 1,2 m) cujo objetivo foi avaliar o comportamento mecânico de seções de pavimentos com dimensões similares às reais, sendo as seções ensaiadas compostas de subleito e uma base (de solo-brita) reforçada ou não com geossintéticos. Como o tanque-teste de Silva (2009a) o equipamento (Figura 2.4) de Kakuda (2010) possui sistema para inundação do subleito o que contribuiu para verificação da ação água no comportamento mecânico da estrutura.

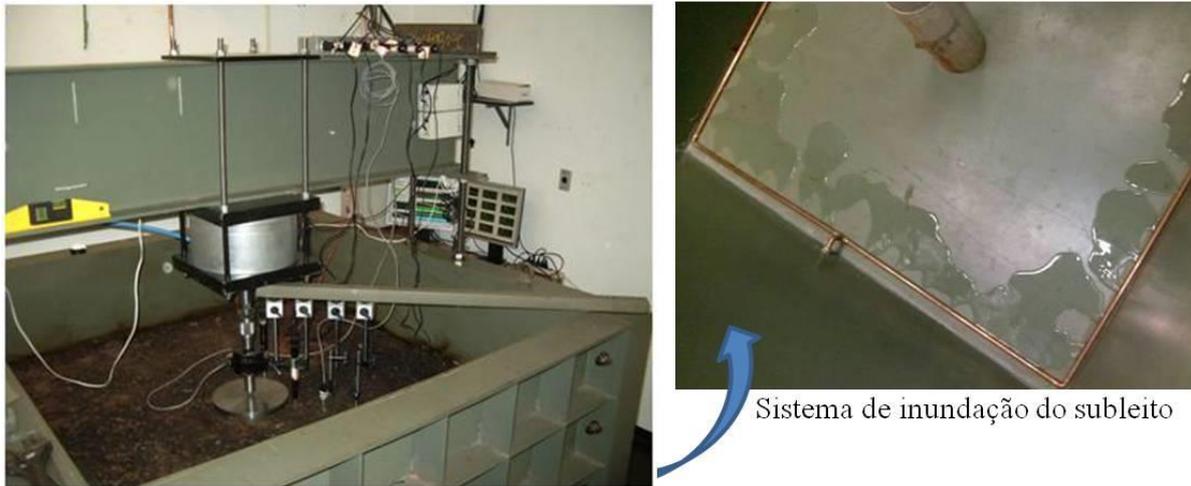


Figura 2.4. Vista geral do equipamento desenvolvido por Kakuda (2010)

As seções foram submetidas a carregamentos cíclicos e a partir das respostas aos carregamentos o autor avaliou o efeito da incorporação da geogrelha por meio das análises das bacias de deflexão e das deformações permanentes observadas. Como conclusão o autor observou que a utilização da geogrelha no reforço da camada de base mostrou-se eficaz tanto na redução das deformações permanentes, como nas elásticas.

Das pesquisas se extrai uma tendência observada durante o levantamento bibliográfico, de que os trabalhos com modelos de grande escala, em sua grande maioria, tratam da aplicação de geossintéticos em pavimentação. Dessa maneira, a seguir são colocadas pesquisas que utilizaram modelos experimentais de laboratório que tentaram reproduzir as condições reais de campo com uso de geossintéticos como elementos de reforço em estruturas de pavimentos.

A partir de um modelo em grande escala feito em concreto com dimensões de 2,0 m x 2,0 m e 1,5 m de altura, ilustrado na Figura 2.5, Perkins (1999) avaliou o mecanismo de atuação de reforço de pavimentos por meio da inclusão de geossintéticos nas seções analisadas na pesquisa. Foram usados três tipos de reforços (um geotêxtil e duas geogrelhas) em oito seções teste, diferentes entre si pela espessura da camada de base e posicionamento do reforço.

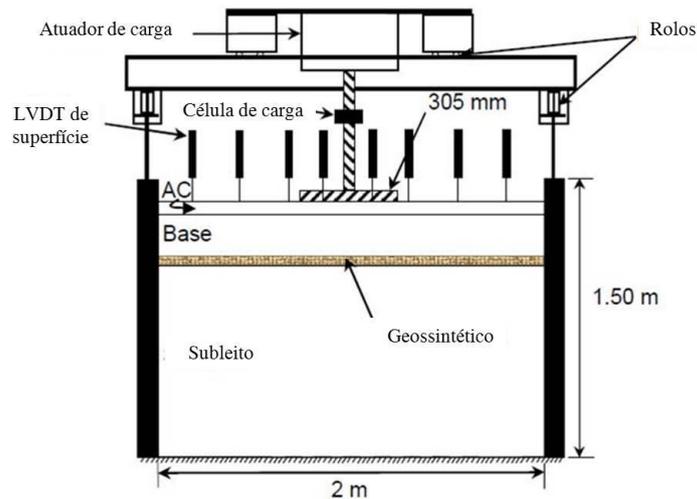


Figura 2.5. Esquema do equipamento de grande escala utilizado por Perkins (1999)

Na pesquisa para a transmissão dos carregamentos cíclicos (com uma frequência de 0,67 Hz) foi utilizado um atuador pneumático responsável por aplicar uma carga máxima de 40 kN distribuída em uma placa circular de aço de 25 mm de espessura e 305 mm de diâmetro, que permitiu fornecer ao sistema uma pressão de contato máxima de 550 kPa.

Ling & Liu (2001) elaboraram uma pesquisa cujo objetivo foi avaliar o desempenho de geossintéticos como elementos de reforço de pavimentos flexíveis mediante diversas condições de carregamento (estáticos com carregamentos monotônicos, estáticos com ciclos de carregamentos e descarregamentos e dinâmicos). Para tanto os autores fizeram o uso de um modelo experimental que simulasse a estrutura de um pavimento composto por uma camada de revestimento e uma camada de subleito. O modelo que os autores utilizaram é composto por uma caixa rígida com dimensões de 60 cm de comprimento, 20 cm de largura e 50 cm de altura, conforme se pode observar na Figura 2.6.

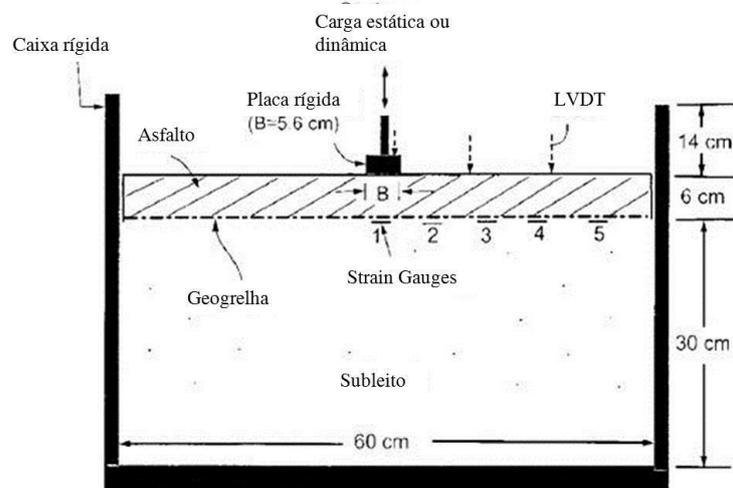


Figura 2.6. Configuração experimental (LING & LIU, 2001)

Para transmissão das cargas Ling & Liu (2001) utilizaram uma placa retangular de 5,6 cm de largura e comprimento igual a 20 cm, e de acordo com o tipo de carregamento variou-se as formas de aplicação das cargas: para os carregamentos estáticos a taxa de aplicação foi de 1,2 mm/min. e para os carregamentos dinâmicos a frequência de aplicação da carga foi de 2 Hz. E para o monitoramento do modelo fizeram o uso de LVDTs acima da camada de concreto asfáltico e a instalação de *strain gages* entre o concreto asfáltico e o subleito.

DeMerchant, Valsankar & Schriver (2002) conduziram pesquisa que visou utilização de agregados leves (argila expandida) reforçados com geossintéticos em pavimentação. Para isso os autores construíram um poço (nas dimensões de 2,2 m x 3,2 m x 1,6 m de profundidade) cujo interior foi destinado para a elaboração de uma estrutura de pavimento com dimensões compatíveis as usadas na realidade, como representa a Figura 2.7. Também na Figura 2.7 é possível observar o sistema de aplicação de transmissão de carga composto uma viga de reação, um atuador hidráulico e uma rígida de 305 mm de diâmetro.

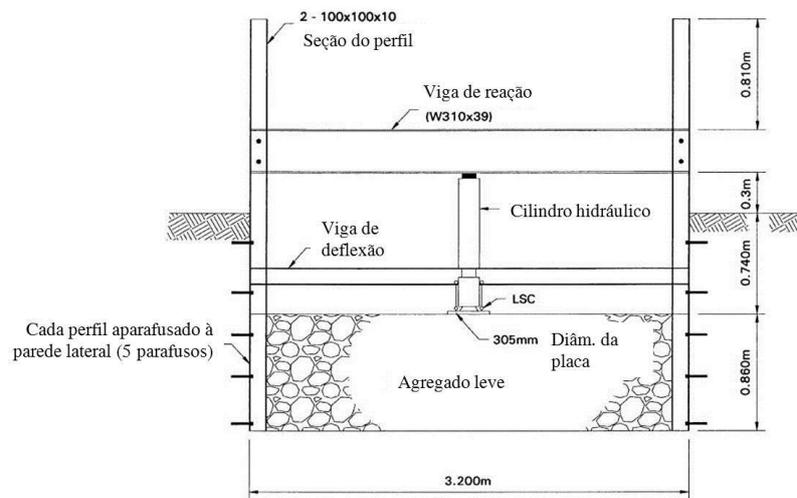


Figura 2.7. Configuração experimental (DEMERCHANT, VALSANKAR & SCHRIVER, 2002)

Nas avaliações os autores fizeram variar a densidade do solo, a espessura do solo reforçado, o local de instalação da geogrelha, o número de camadas reforçadas com geogrelhas e as resistências das geogrelhas. Das pesquisas descritas pode-se observar que em sua totalidade os pesquisadores utilizaram placas rígidas para simular superfície de contato de um pneu.

A Tabela 2.2 a seguir demonstra as especificações dos carregamentos, frequência de aplicação e dimensão da superfície de contato de pesquisas que trabalharam com equipamentos de grande escala. A partir dela é possível concluir que em todas as pesquisas a simplificação mais notória está na forma de transmissão de carregamento por meio da aplicação de carregamentos em uma placa rígida, todavia percebe-se a inclusão de rodas como elemento de aplicação de carga.

Tabela 2.2. Levantamento bibliográfico de equipamentos de ensaio (PERKINS & ISMENK,1997 *apud.* KAKUDA, 2010)

	Autores	Dimensões (m)	Tipo de carga	Pressão (kPa)	Frequência ou Velocidade
(1)	Al-Qadi <i>et al.</i> (1994)	3,1 x 1,8 x 2,1	Disco 300 mm	550	0,5 Hz
(2)	Barker (1987)	21 x 4,6 x 1,1	Uma roda movendo em trilha	1826	NR
(3)	Barksdale <i>et al.</i> (1989)	4,9 x 2,4 x 1,5	Uma roda movendo em trilha	460-500	1,3 m/s
(4)	Brown <i>et al.</i> (1982)	4,9 x 2,4 x 1,5	Uma roda movendo em trilha	530	1,3 m/s
(5)	Cancelli <i>et al.</i> (1996)	0,9 x 0,9 x 0,9	Disco 300 mm	570	5 ou 10 Hz
(6)	Collin <i>et al.</i> (1996)	14,6 x 2,4 x 1,2	Uma roda movendo em trilha	550	1,2 m/s
(7)	Halliday and Potter (1984)	20 x 4,25 x 1,5	Duas rodas	760	1,4 - 2,2 m/s
(8)	Hass <i>et al.</i> (1988)	4,5 x 1,8 x 0,9	Disco 300 mm	550	8 Hz
(9)	Miura <i>et al.</i> (1990)	1,5 x 1,5 x 1,0	Disco 200 mm	200	0,18 Hz
(10)	Moghaddas-Nejad and Small (1996)	1,4 x 0,5 x 0,8	Uma roda movendo em trilha	210	1,3 m/s
(11)	Webster (1993)	44 x 3,8 x 1	Uma roda movendo em trilha	470	-

Uma das conclusões importantes obtida por Amiri, Nazarian & Fernando (2009) e que serve como justificativa deste trabalho é que a partir de modelos em laboratório, quando bem elaborados e com bom controle de construção, podem-se obter resultados de comportamento próximos a seções de pavimentos reais.

A boa correlação do modelo utilizado pelos autores em laboratório com um ensaio feito em campo pode ser observado na Figura 2.8. Assim, os testes em modelos experimentais em laboratório podem ser efetivamente usados para calibrar e validar os modelos reais em diferentes condições.

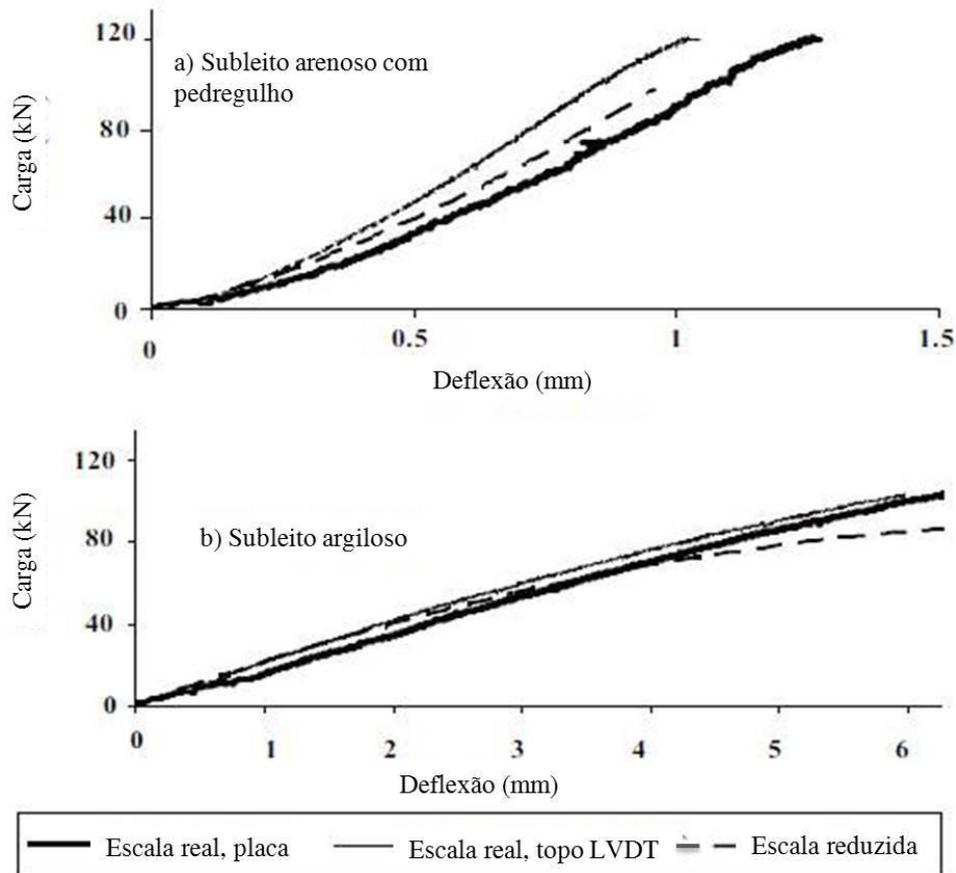


Figura 2.8. Comparação dos resultados experimentais em pequena escala e em grande escala (modificado de AMIRI, NAZARIAN & FERNANDO, 2009)

Contudo, alguns centros vêm demonstrando novas tendências para modelos de grande escala, em laboratório, com maior similitude com projetos reais, a exemplo pode-se citar o centro de pesquisa *Chongqing Communications Research & Design Institute* (CCRDI) localizado na república popular da China. O CCRDI detém nas suas instalações uma pista circular equipada com um simulador de tráfego (Figura 2.9 (a)) que é composto por um eixo simples com rodas duplas com capacidade de carga de 110 kN e pressão dos pneus igual a 0,7 MPa.

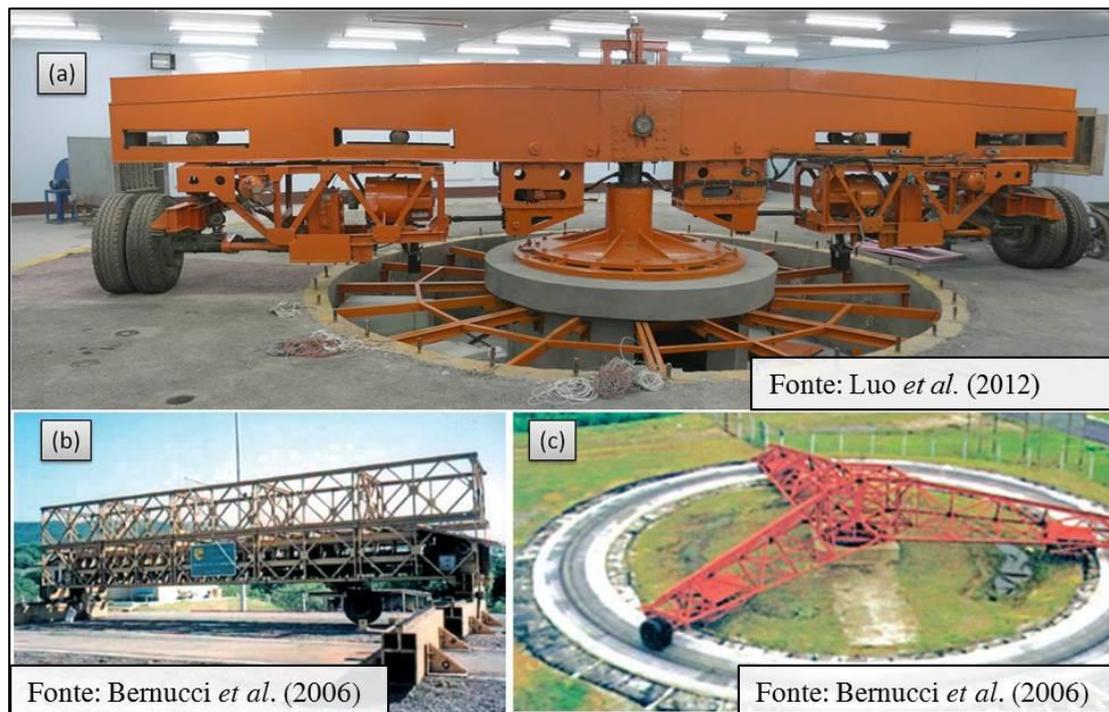


Figura 2.9. Simuladores de tráfego: (a) do CCRDI, (b) da UFRGS/DAER-RS em Porto Alegre e (c) do IPR Rio de Janeiro.

Luo *et al.* (2012) desenvolveram pesquisa no simulador do CCRDI onde avaliaram o efeito da deformação permanente em três estruturas de pavimento, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Estrutura do pavimento das três estruturas de teste (Luo *et al.*, 2012)

Segmento A	Segmento B	Segmento C
40 mm SMA 13 (asfalto modificado, basalto)	50 mm SMA 13 (asfalto modificado, basalto)	40 mm SMA 13 (asfalto modificado, basalto)
80 mm Superpave19 (asfalto modificado, calcário)	2x80 mm Superpave19 (asfalto modificado, calcário)	80 mm Superpave19 (asfalto modificado, calcário)
80 mm Superpave25 (base asfáltica, calcário)		75 mm Superpave25 (base asfáltica, calcário)
2x100 mm ATB25 (base asfáltica, calcário)	2x80 mm Superpave25 (base asfáltica, calcário)	10 mm lama asfáltica
200 mm agregado estabilizado com cimento (5%)	220 mm agregado graúdo	360 mm agregado estabilizado com cimento (5%)
840 mm solo melhorado com cal	850 mm solo melhorado com cal	800 mm solo melhorado com cal
600 mm Subleito argiloso	600 mm Subleito argiloso	600 mm Subleito argiloso

Diferente de muitos simuladores como os: da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Departamento autônomo de estradas e rodagem do Rio grande do Sul (Figura 2.9 (b)) e do

Instituto de Pesquisas Rodoviárias (Figura 2.9 (c)) que se encontram em ambiente externo, o utilizado na pesquisa de Luo *et al.* (2012) permite avaliar as condições de projeto sob condições térmicas controladas por meio de sistema de controle de temperatura. Dessa forma, para acelerar a ocorrência de deformação permanente, a temperatura da camada de rodagem foi controlada em torno de $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por meio do sistema de controle de temperatura, que é o mais próximo à temperatura da superfície real do pavimento asfáltico no município de Chongqing.

2.5 FUNDAMENTOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A capacidade e/ou desempenho de uma estrutura de um pavimento flexível está diretamente relacionada com a capacidade de suporte das camadas subjacentes diante da redistribuição de tensões promovida pela carga de contato atuante na camada de revestimento. Essas respostas estruturais do pavimento podem ser computadas por meio de soluções analíticas e numéricas, sendo em sua grande maioria baseadas teoria elástica de múltiplas camadas.

É importante salientar que a teoria relacionada não permite prever o acúmulo de deformações permanentes ou plásticas diante de situações onde o carregamento é cíclico. Porém, existem diversas metodologias que visam prever o acúmulo de deformações permanentes tanto para o material de revestimento como para os materiais das camadas subjacentes. No tocante a solos ou materiais terrosos, por possuírem características singulares, é fácil imaginar que não existe um modelo perfeito para todos os tipos de materiais. Segundo Guimarães (2009), existe uma dificuldade em modelar adequadamente a deformação permanente dos solos, pois são apresentadas várias formulações matemáticas distintas que incluem um conjunto de variáveis, nem sempre as mesmas em cada caso.

Portanto, com base nos argumentos expostos nos itens que se seguem será feita uma revisão dos conceitos teóricos que deram suporte para a análise das respostas estruturais do modelo experimental construído nessa pesquisa.

2.5.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ANÁLISE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA PAVIMENTOS

Pode-se estabelecer que os pavimentos são modelados em camadas com dimensões semi-infinitas e de comportamento mecânico regido pela teoria da elasticidade, isso implica

que as relações constitutivas dos materiais são definidas por meio do módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (μ). Somado a isso se assume que as camadas têm um comportamento homogêneo e isotrópico. No entanto, para as camadas granulares, os materiais podem ser tratados como elástico linear e não linear, (isto é, tendo módulos que são independentes e dependentes das tensões, respectivamente), enquanto que o concreto asfáltico pode ser tratado como elástico linear ou viscoelástico linear (PAPAGIANNAKIS & MASAD, 2007).

Assim, a avaliação estrutural de pavimentos passa por três métodos de solução: (i) para um meio semi-infinito e homogêneo (solução de Boussinesq), (ii) para um meio semi-infinito estratificado (solução de Burmister) e (iii) solução de múltiplas camadas.

2.5.1.1 SOLUÇÃO DE MÚLTIPLAS CAMADAS

Ao pensar em pavimentos flexíveis, é comum delineá-lo como sendo uma estrutura composta por múltiplas camadas (revestimento, base, sub-base, reforço de subleito) de espessuras finitas apoiadas sobre um subleito. Isto conduz a estudos e soluções por meio de sistemas de múltiplas camadas que têm suas soluções por meio da extensão da abordagem analítica de Burmister para sistemas compostos por várias camadas.

Com o advento dos computadores, a teoria pode ser aplicada a um sistema de multicamadas com um número qualquer de camadas por meio da implementação das soluções em software. Dessa forma, uma variedade de programas computacionais foi produzida, tais como: DAMA, EVERSTRESS, ELSYM5 e KENLAYER. Esses programas possuem características semelhantes tanto nos parâmetros de entrada como no número de camadas que podem suportar: cinco camadas, incluindo um subleito de profundidade infinita. Eles aceitam múltiplas cargas pneumáticas de formato circular e a definição das tensões em qualquer local do sistema de camadas. Os cálculos são feitos no sistema de coordenadas radial, e, em seguida, traduzido para um sistema de coordenadas cartesianas, com a sua origem no meio de do carregamento.

De maneira complementar e de forma também bem difundida na engenharia, o método dos elementos finitos (MEF) também contribuiu para a solução de problemas com múltiplas camadas para pavimentos flexíveis. O procedimento básico do método consiste em dividir o meio contínuo, através de elementos finitos, formular as propriedades de cada elemento, reunir as equações dos elementos para obter o modelo discretizado da estrutura, aplicar os carregamentos conhecidos, especificando como o modelo é vinculado, resolver o sistema de

equações algébricas resultantes, para então calcular todos os deslocamentos desconhecidos, bem como os valores de tensão e deformação desejados (KAKUDA, 2010).

De forma geral existe no mercado softwares que usam MEF, por exemplo, FEPAVE2, SIGMA-W e o PLAXIS, que podem ser usados para o estudo de tensões e deformação em pavimentos flexíveis, contudo de maneira a esclarecer os aspectos das ferramentas utilizadas nesta pesquisa só será feita a referência ao programa PLAXIS Versão 7. O PLAXIS é um pacote computacional de elementos finitos destinado à análises de deformação, deslocamento e estabilidade de projetos de engenharia geotécnica. Dependendo da versão do programa (PLAXIS Version 7; PLAXIS 3D *foundation*) é capaz de se efetuar análise bi-dimensional e tri-dimensional, por modelos elásticos lineares, elastoplásticos dentre outros. Em situações em que se tenha um estado plano de tensões e condições axissimétricas como as usadas neste trabalho, de forma a representar uma estrutura de pavimento, pode-se obter resultados satisfatórios de forma bem prática e ágil.

2.5.1.2 MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A metodologia utilizada na análise de sistemas de múltiplas camadas é sustentada pela teoria da elasticidade e não permite a previsão do acúmulo das deformações permanentes para as camadas do pavimento. Com isso, foram desenvolvidas metodologias que preveem o acúmulo de deformações permanentes para as camadas do pavimento, tais como o revestimento, base e subleito.

Medina & Motta (2005) e o guia do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP 1-37A, 2004) colocam que se pode calcular a deformação total sob uma carga P como o somatório das deformações plásticas ou permanentes de cada camada ou subcamada, conforme Eq. (2.1).

$$\delta_{p\text{total}} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{p(i)} \cdot h_i) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

onde $\varepsilon_{p(i)}$ é a deformação plástica média da i-ésima camada, h_i a espessura da i-ésima camada e n o número total de camadas.

Como será descrito a seguir, as deformações plásticas ε_p em cada camada do pavimento será calculada a partir da deformação elástica ε_v (ou resiliente) vertical correspondente, usando as análises elásticas lineares em função do tipo de material constituinte da camada.

2.5.1.3 MODELO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

Para as misturas asfálticas, o modelo constitutivo do guia da AASHTO (2002) é o utilizado para previsão do acúmulo de deformação permanente. O modelo foi obtido a partir da calibração entre ensaios de campo e ensaios dinâmicos de deformação permanente em laboratório, realizados por grupo de pesquisadores da AASHTO.

Segundo AASHTO (2002), as deformações plásticas (ϵ_p) nas camadas de concreto asfáltico são calculadas em função das deformações elásticas verticais (ϵ_v) por meio de análises elásticas utilizando a Eq. (2.2), a seguir:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_v} = k_1 10^{-3,4488T^{1,5606}N^{0,479244}} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

onde T é a temperatura da camada de concreto asfáltico em fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), N é o número acumulado de ciclos de carga, e k_1 (fator de calibração) é em função da espessura da camada asfáltica e da profundidade do ponto de análise e foi introduzido para promover uma previsão mais acurada possível do afundamento de trilha de roda (MEDINA & MOTTA, 2005). Expresso em função da variável profundidade z , em polegadas, k_1 pode ser expresso pela Eq. (2.3):

$$k_1 = (C_1 + C_2 \cdot z)0,328196^z \quad \text{Eq. (2.3)}$$

onde:

$$C_1 = -0,1039 \cdot h_{ac}^2 + 2,4868 \cdot h_{ac} - 17,342 \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$C_2 = 0,0172 \cdot h_{ac}^2 - 1,7331 \cdot h_{ac} + 27,428 \quad \text{Eq. (2.5)}$$

onde: h_{ac} igual a espessura de da camada de concreto asfáltico.

2.5.1.4 MODELOS PARA CAMADAS GRANULARES

Com base no NCHRP 1-37A que adaptou o modelo desenvolvido por Tseng e Lytton (1989) para previsão de deformações plásticas em camadas granulares, a equação para a determinação destas deformações é escrita da de acordo com a Eq. (2.6):

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_v} = \beta_G \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

onde β , ρ , e ε_0 são propriedades do material obtidas mediante ensaios de laboratório envolvendo cargas cíclicas para uma deformação resiliente ε_r , N é o número de ciclos de carregamento, e β_G corresponde a uma constante de calibração com valor de 1,673 para camadas de bases e 1,35 para camadas de subleito.

Os valores de β e ρ são obtidos pela Eq. (2.7) e Eq. (2.8), respectivamente:

$$\log \beta = -0,6119 - 0,017638W_c \quad \text{Eq. (2.7)}$$

$$\rho = 10^9 \left(\frac{-4,89285}{1-(10^9)^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

onde W_c (%) é a umidade do material.

A razão $\varepsilon_0/\varepsilon_r$ é calculada a partir da média ponderada das medidas experimentais após 1 e 10^9 ciclos de carga, conforme expresso na Eq. (2.9).

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} = \frac{1}{2} \left(0,15 \cdot e^{(\rho)^\beta} + 20e^{\left(\frac{\rho}{10^9}\right)^\beta} \right) \quad \text{Eq. (2.9)}$$

É importante que se faça observações sobre o método proposto por Tseng e Lytton (1989). Segundo Guimarães (2009), a adoção do modelo de Tseng e Lytton (1989) conduz a falhas nas previsões, pois o modelo foi criado de forma “fechada” não permitindo a implementação de novas contribuições, principalmente, quando se deparasse com solos de regiões tropicais e materiais alternativos como o resíduo de construção e demolição.

Com esse cenário, são apresentados os modelos de Monismith *et al.* (1975) e Uzan (1985) os quais adotam parâmetros que podem tanto ser obtidos na literatura, por comparação, quanto gerados a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas, ou seja, estes modelos são “abertos” a novas contribuições a partir de novos ensaios (GUIMARÃES, 2009). Monismith *et al.* (1975) propuseram a previsão de deformações permanente segundo a Eq. (2.10) abaixo:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B \quad \text{Eq. (2.10)}$$

onde ε_p é igual deformação específica plástica, A e B são parâmetros experimentais e N número de repetições de carga.

Os parâmetros A e B da formulação proposta por Monismith *et al.* (1975) além de serem obtidos experimentalmente os mesmos sofrem influência direta do número de ciclos utilizado para ajustar a reta de mínimos quadrados. Dessa forma, Guimarães (2009) coloca que os estudos encontrados nas referências bibliográficas geralmente adotaram um número de aplicação de ciclos de carga, número N , quase sempre inferior a 10^5 ciclos, sendo que na maioria dos projetos o N utilizado é superior a 10^6 , o que torna necessária uma extrapolação dos valores do domínio das equações.

Uzan (1985) propôs um modelo que relaciona o acúmulo da deformação permanente (ε_p) à deformação resiliente atuante (ε_r) a partir da diferenciação da equação proposta por Monismith *et al.* (1975), cuja Eq. (2.11) segue escrita abaixo:

$$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_r} = \mu \cdot N^{-\alpha} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

onde ε_p é a deformação permanente total para o ciclo N , o parâmetro α é definido tal que $\alpha = 1 - B$, e o parâmetro μ , é tal que $\mu = A \cdot B / \varepsilon_r$, onde ε_r é a deformação resiliente ou elástica, admitida independente de N .

Das referências consultadas, pode-se chegar a um consenso de que não existe um único modelo que detenha uma maior ou menor exatidão na predição do acúmulo de deformações permanentes, seja para materiais granulares ou argilosos. No entanto, percebe-se que a experiência nacional em adotar os modelos de Monismith *et al.* (1975) e Uzan (1985) trazem uma boa correlação entre os resultados experimentais e os modelos de previsão. É importante se destacar novamente o trabalho de Guimarães (2009), haja vista que, o autor faz uma boa revisão bibliográfica dos modelos desenvolvidos para a previsão de deformação permanente, mais usuais e os desenvolvidos de maneira específica para materiais granulares e argilosos.

A Tabela 2.4 e a Tabela 2.5 a seguir trazem de forma compilada modelos de previsão de deformação permanente tanto em solos granulares como em solos argilosos. As pesquisas e suas respectivas formulações foram extraídas, e aqui dispostas em tabela, a partir do trabalho de Lekarp & Dawson (1998) que são citados nos trabalhos de Guimarães (2009) e Gómez¹ (2014).

¹ GÓMEZ, A. M. (2014). Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos. Tese de Doutorado em andamento.

Tabela 2.4. Quadro resumo dos modelos empregados para à previsão da deformação permanente em solos granulares

Autores	Formulação	Parâmetros
Lentz & Baladi (1981)	$\varepsilon_{1,p} = \varepsilon_{0,95s} \cdot \ln \left(1 - \frac{q}{s} \right)^{-0,15} + \left\{ \frac{n \cdot \left(\frac{q}{s} \right)}{\left[1 - m \cdot \left(\frac{q}{s} \right) \right]} \right\} \cdot \ln(N)$	$\varepsilon_{1,p}$ = deformação permanente acumulada após N ciclos; $\varepsilon_{0,95s}$ = deformação estática a 95% da resistência estática; q = tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$); S = resistência estática; N = número de ciclos de cargas m = parâmetros de regressão, que variam com a tensão confinante.
Veverka (1977)	$\varepsilon_{1,p} = a \cdot \varepsilon_r \cdot N^b$	ε_r = deformação específica resiliente; a e b = parâmetros do material; $\varepsilon_{1,p}$ = deformação específica permanente.
Jouve <i>et al.</i> (1987)	$K_p(N) = \frac{p}{\varepsilon_{v,p}(N)}$ $G_p(N) = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_{s,p}(N)}$	$K_p(N)$ = módulo de compressão associado à deformação permanente; $G_p(N)$ = módulo de cisalhamento associado à deformação permanente; $\varepsilon_{v,p}(N)$ = deformação permanente volumétrica para $N > 100$; $\varepsilon_{s,p}(N)$ = deformação cisalhante para $N > 100$; p = média das tensões principais; q = tensão desvio; N = número de ciclos de aplicação de carga.
Barksdale (1972)	$\varepsilon_{1,p} = a + b \cdot \log(N)$	a e b = constante para um determinado nível de tensão.
Sweere (1990)	$\varepsilon_{1,p} = a \cdot N^b$	
Wolf & Visser (1994)	$\varepsilon_{1,p} = (m \cdot N + a) \cdot (1 - e^{-bn})$	a , b e m = parâmetros de regressão.
Khedr (1985)	$\frac{\varepsilon_p}{N} = A \cdot N^{-m}$	m = parâmetro do material; A = parâmetro do material e do estado de tensão; N = número de ciclo de aplicação de cargas.
Paute <i>et al.</i> (1990)	$\varepsilon_{1,p}^* = A \cdot \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-b} \right]$ $A = \frac{\frac{q}{(p+p^*)}}{a - m \cdot \frac{q}{(p+p^*)}}$	$\varepsilon_{1,p}^*$ = deformação permanente adicional após os primeiro 100 ciclos de carga; A e B = são os parâmetros de regressão.
Barksdale (1972)	$\varepsilon_{1,p} = \frac{\frac{q}{K \cdot \sigma_3^n}}{1 - \left[\frac{(R_f \cdot q)/2(C \cdot \cos\phi + \sigma_3 \cdot \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)} \right]}$	$K \cdot \sigma_3^n$ = relação que define o módulo tangente como uma função da tensão confinante (K e n são constantes); C = coesão aparente; ϕ = ângulo de atrito interno; R_f = constante que se relaciona com a resistência à compressão; q = tensão desvio.
Pappin (1979)	$\varepsilon_{s,p} = (fn \cdot N) \cdot L \cdot \left(\frac{q^0}{p^0} \right)_{max}^{2,8}$	$\varepsilon_{s,p}$ = deformação permanente cisalhante acumulada; $fn \cdot N$ = fator de forma; q^0 = tensão desvio modificada = $\sqrt{2/3} \cdot q$; p^0 = média das tensões principais modificada = $\sqrt{3} \cdot p$
Lekarp & Dawson (1998)	$\frac{\varepsilon_{1,p}(N_{ref})}{L} = a \cdot \left(\frac{q}{p} \right)_{max}^b$	$\varepsilon_{1,p}(N_{ref})$ = deformação permanente acumulada para $N > 100$; L = comprimento da trajetória de tensões; q = tensão desvio; p = média das tensões principais; a , b = parâmetros de regressão.
Werkmeister <i>et al.</i> (2003)	$\varepsilon_p^I(N) = A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^B + C \left(e^{D \frac{N}{1000}} - 1 \right)$ <p>Os coeficientes A e B são definidos por:</p> $A = a_1 + a_2 \sigma_1^{a_3} + a_4 \sigma_m^{a_5}$ <p style="text-align: center;">&</p> $B = b_1 + b_2 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_1} \right)^{b_3} + b_4 \sigma_1^{b_5}$	ε_p^I = deformação permanente vertical ($\times 10^{-3}$ mm); A , B , C , D = coeficientes; N = número de ciclos de aplicação de carga.

Tabela 2.5. Quadro resumo dos modelos empregados para à previsão da deformação permanente em solos argilosos

Autores	Formulação	Parâmetros
Majidzadeh <i>et al.</i> (1976)	$\varepsilon_p/N = A \cdot (D \cdot W) \cdot N^{-m}$	ε_p = deformação permanente; $A(D, W)$ = interseção da linha reta (ε_p/N x N) com o eixo ε_p/N ; m = valor absoluto do coeficiente angular da mesma reta; N = número de ciclos.
Majidzadeh, Bayomy & Khedr (1978)	$\varepsilon_p/N = A \cdot N^m$ <p>O parâmetro A é correlacionado ao módulo dinâmico resiliente E^*:</p> $A = K \cdot E^* ^s$	ε_p = deformação permanente; N = número de repetições de tensão; A, m = parâmetros de afundamento; K, s = parâmetros que dependem da tensão dinâmica aplicada repetidamente.
Odermatt (2000)	$\varepsilon_{pz} = A \cdot N^\alpha \cdot \left(\frac{\sigma_z}{p}\right)^\beta \cdot (\varepsilon_z)^\gamma$	ε_{pz} = deformação permanente vertical acumulada na profundidade z ; ε_z = deformação elástica na profundidade z ; σ_z = tensão vertical na profundidade z ; p = tensão de referência (MPa), tensão atmosférica 0,1 MPa; A, α, β, γ = constantes experimentais.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos de ensaio

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Esta tese de doutorado segue as seguintes etapas básicas: uma etapa experimental com o objetivo para avaliação do RCD em um modelo físico de verdadeira grandeza e a outra consiste em uma análise numérica. Como a pesquisa aqui desenvolvida faz parte de um projeto maior no âmbito PRONEX (Materiais reciclados para utilização em pavimentação) a parte inicial dos estudos experimentais já foi bem definida durante a pesquisa de Gómez (2011) que efetuou a caracterização básica do RCD (ensaios de granulometria, Abrasão *Los Angeles*, compactação, ISC). No entanto, como será visto adiante esta pesquisa propõe a utilização do RCD-R do jeito que ele sai após o processo final de britagem, o que difere da metodologia empregada por Gómez (2011).

Dando seguimento a avaliação experimental, foram realizados estudos do comportamento mecânico do RCD por meio dos ensaios de módulo de resiliência (contemplados também durante a pesquisa de Gómez (2011)) e a caracterização dos materiais asfálticos utilizados no modelo reduzido seguiu a metodologia *Marshall* e a Resolução ANP nº19 de 11/07/2005.

Por fim, com os resultados obtidos da etapa experimental, em forma de parâmetros, foi possível realizar a retroanálise a partir do modelo numérico, baseado na teoria de métodos de elementos finitos, já implementado no programa Plaxis 7. A opção por adotar este programa é justificada por seu baixo tempo de processamento e por sua fácil operacionalização.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir, serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, ou seja, o agregado reciclado, o solo e os materiais betuminosos, o cimento asfáltico e o asfalto diluído, materiais estes que foram utilizados para a construção do modelo físico.

3.1.1 AGREGADO RECICLADO (AR)

Basicamente o resíduo utilizado na pesquisa é o mesmo utilizado na pesquisa de Gómez (2011). O resíduo de características tipo “classe A” (classificação segundo a Resolução nº 307 do CONAMA) é proveniente da demolição do estádio Mané Garrincha. Este resíduo foi enviado para a área pertencente a empresa Areia Bela Vista, que fica localizada próxima ao plano piloto do Distrito Federal (DF). A empresa localizada na cidade satélite de Sobradinho II vem constantemente recebendo resíduos de construção e demolição que são processados e assim consumidos junto a areia presente na jazida, para obtenção final de areias destinadas ao setor da construção civil.

O processo de obtenção do areia reciclada ou RCD-R inicia-se a partir da chegada do resíduo no pátio de armazenagem da Empresa Areia Bela Vista, na qual o resíduo passa por um processo de triagem para remoção de contaminantes como plásticos, metais e madeira com tamanhos superiores a 50 cm. Esta etapa é feita manualmente ou com auxílio de máquinas próximo à pilha de RCD. Em seguida, o RCD é levado para um britador de mandíbulas, com auxílio de uma retroescavadeira, onde é reduzido até uma fração de dimensão máxima próxima a 70 mm (1º processo de britagem), conforme ilustrado na Figura 3.1.

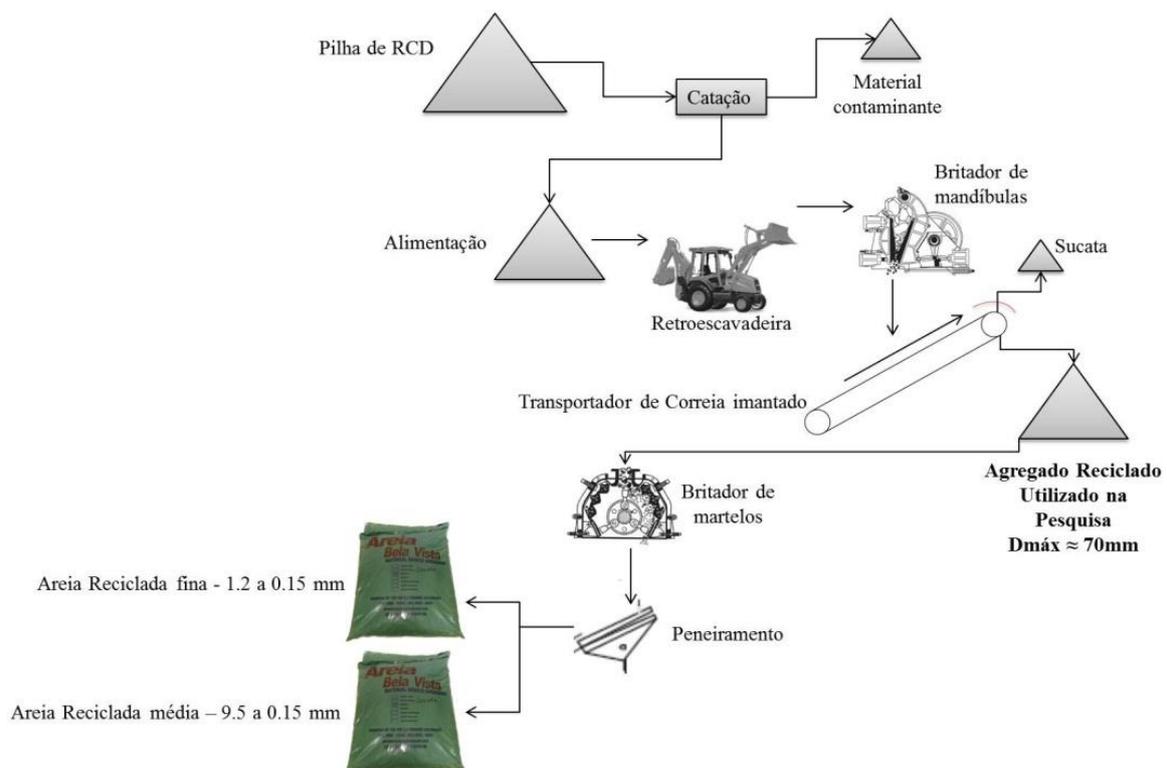


Figura 3.1. Esquema de produção adotado pela Areia Bela Vista na produção do agregado reciclado

Posteriormente, já na UnB, o material foi submetido a um 2º processo de britagem (Figura 3.2), de forma a se enquadrar na faixa C da norma DNIT 141/2010 – ES (Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente). A faixa C utilizada na pesquisa foi escolhida por ser a faixa mais empregada nos projetos de pavimentação do Distrito Federal.



Figura 3.2. Resultado final após segundo processo de britagem

Para classificação do AR segundo a NBR 15116 (2004d), como agregado de resíduo de concreto (ARC) ou agregado de resíduo misto (ARM), considerando apenas o material retido na peneira N°4 (4.75 mm), foram coletadas amostras após o processo de britagem no pátio da empresa Areia Bela Vista. Próximo a pilha de RCD foram feitos os seguintes procedimentos: (a) identificação do local de coleta via coordenadas UTM; (b) e (c) com auxílio de uma carregadeira mecânica cerca de 1,0 m³ de RCD foi coletado e espalhado em uma superfície plana; (d) e (e) depois de homogeneizar e quartear o RCD foram coletadas duas amostras em tambores metálicos; (f) por fim o material foi seco e peneirado na peneira N°4 para posteriormente iniciar o procedimento de catação e classificação dos materiais constituintes conforme ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3. Metodologia empregada para coleta e classificação do RCD.

3.1.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante utilizado na pesquisa, especificamente utilizado na realização do ensaio de adesividade entre o par agregado reciclado e CAP, é proveniente da refinaria da Petrobrás em Betim/MG, disponibilizado pela empresa Centro Oeste Asfaltos (Brasília/DF), sendo suas características básicas listadas na Tabela 3.1. Observa-se que o ligante atende a todos os valores de referência, sugeridos pelas normas, exceto o índice de susceptibilidade térmica.

Tabela 3.1. Caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70 (SOUZA *et al.*, 2012)

Ensaio	Unid.	Valor de Referência para o CAP 50/70	CAP 50/70
Penetração (100 g,5s,25°C)	0,1mm	50 - 70	53
Ponto de amolecimento	°C	46	46,5
Viscosidade Brookfield			
a 135°C, sc 21 (20 rpm)	cP	274	385
a 150°C, sc 21 (20 rpm)	cP	112	165
a 177°C, sc 21 (20 rpm)	cP	57 - 285	60
G*/senδ (46°C)	kPa	> 1	22
Índice de susceptibilidade térmica	-	(-1,5) a (+0,7)	-2
Ponto de combustão	°C	N.A.	385
Ponto de Fulgor	°C	235	325
Densidade CAP	-	N.A.	1,07
Ductilidade a 25°C	cm	60	100
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.			
Varição em massa	% massa	≤ 0,5	0,16%
Aumento do ponto de amolecimento	°C	≤ 8	1,5
Penetração retida	%	≥ 55	73%
G*/senδ (46°C)	kPa	> 2	33

3.1.3 ASFALTO DILUÍDO

Para execução da imprimação da camada de base do modelo físico foi adquirido com a empresa Centro Oeste Asfaltos (Brasília/DF) uma amostra de cinco litros de asfalto diluído (ADP) do tipo CM 30, cujas especificações estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Caracterização do asfalto diluído do tipo CM-30 (Centro Oeste Asfaltos, 2012)

Característica	Unid.	Especificação	Resultado	Método ASTM
Viscosidade Cinemática a 60°C	cSt	30 a 60	54,1	D 2170
Ponto de fulgor	°C	38 mín.	90	D 3143
Destilado a 225°C	% volume	25 máx.	10,1	D 402
Destilado a 260°C	% volume	40 a 70	60,8	D 402
Destilado a 316°C	% volume	75 a 93	89,9	D 402
Resíduo a 360°C por diferença	% volume	50 mín.	60,5	D 402
Água por destilação	% volume	0,2 máx.	0,10	D 95
Viscosidade a 60°C no resíduo da dest.	p	300 a 1200	599	D 2171
Solu. no tricloroet. no resíduo da dest.	% massa	99,0 mín.	99,9	D 2042
Ductil. 15,5 °C no resíduo da destilação	cm	100 mín.	>150	D 113
Densidade relativa a 20/4°C	N.A.	Anotar	0,9255	D 4052

3.1.4 SOLO DE SUBLEITO PARA O MODELO FÍSICO

Como parte integrante para as análises no modelo físico de verdadeira grandeza optou-se por utilizar um solo que caracterizasse situações típicas do subleito recorrente no Distrito Federal. Com base nessa prerrogativa, optou-se por utilizar solos devidamente caracterizados em pesquisas do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB (PPG-UnB).

O solo utilizado foi coletado a partir da movimentação de terra oriunda da execução da fundação do novo prédio da Engenharia Florestal (Lat. 15°45'41''S / Long. 47°52'52,24''W) localizado no campus universitário da Universidade de Brasília ao lado da Faculdade de Tecnologia, conforme Figura 3.4.

Todavia, durante a pesquisa foi necessária uma segunda coleta de solo para elaboração da camada de subleito do modelo físico. Nessa segunda coleta, conforme Figura 3.4, o solo foi obtido a uma profundidade mínima de um metro na antiga área de ensaios de campo do PPG-UnB em dias atuais desativado. Ressalta-se que, conforme ilustrado na Figura 3.5 foi realizado o procedimento de coleta e preparação da amostra de ambos os solos para os ensaios básicos de caracterização, resistência e módulo de resiliência.

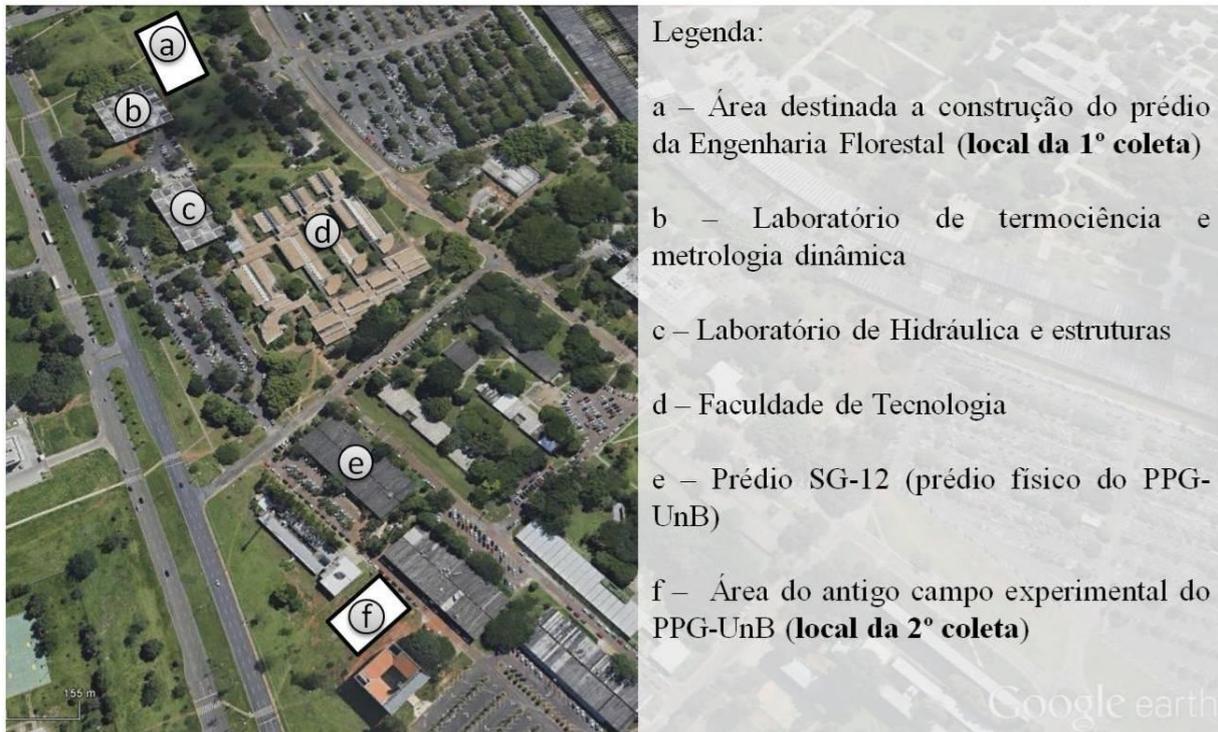


Figura 3.4. Vista aérea da região de coleta do material do subleito.



Figura 3.5. Preparação do solo do subleito para caracterização

Embora aparentemente pertencentes a perfis geotécnicos próximos, ambos os solos apresentaram características distintas como será visto adiante, no capítulo de resultados. Ao observar o perfil colocado por Mota (2003), Figura 3.6, estima-se que o solo referente a 1ª coleta deva pertencer ao horizonte compreendido entre as profundidades 3,5 e 8,5 m, pois a coleta foi realizada durante a execução das fundações do novo prédio da Engenharia Florestal. Por outro lado, pode se afirmar que o solo da 2ª coleta está compreendido entre as

profundidades de 0 e 3,5 m como o pode observar na Figura 3.6 que ilustra a local de coleta dos solos.

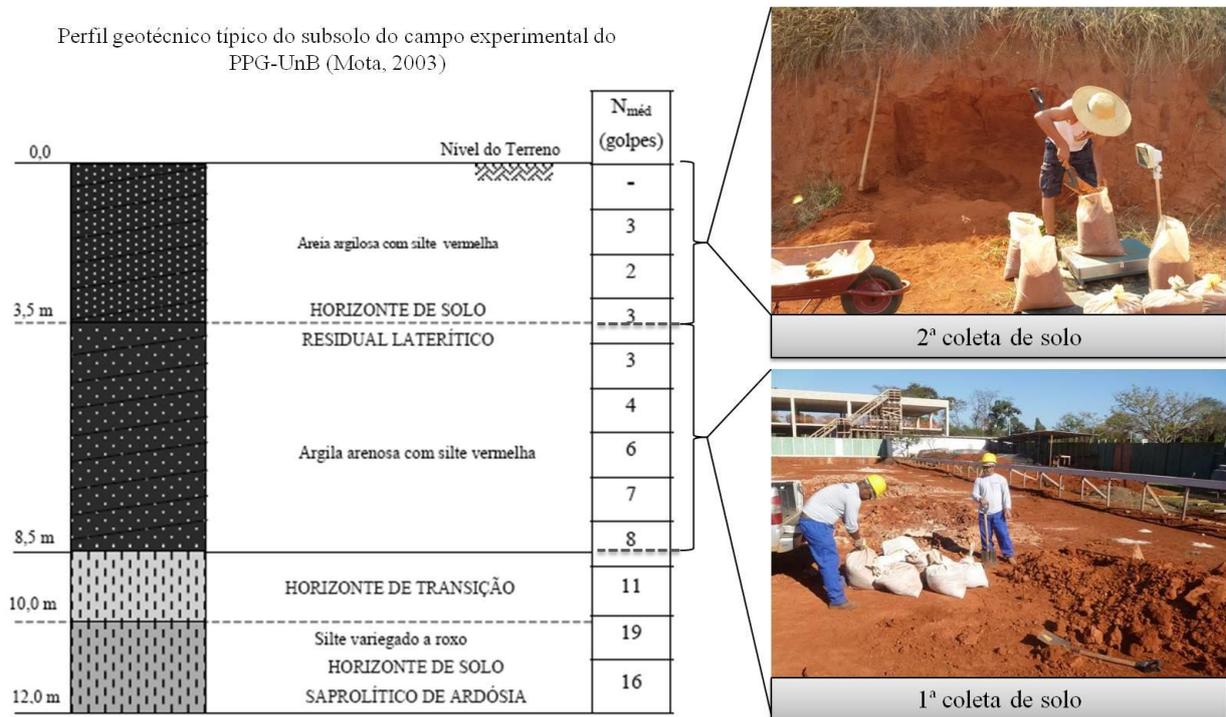


Figura 3.6. Perfil geotécnico típico do subsolo da região e procedimento de coleta do solo

Na primeira coleta, foi extraída aproximadamente uma tonelada e meia de solo que precisou ser preparada para ser usada como solo do subleito do modelo físico. Todo o material coletado foi seco ao ar, peneirado na peneira nº 4 e o material retido destorroado. Posteriormente, todo solo foi acondicionado em sacos plásticos de 20 kg para obter um melhor controle durante a construção das camadas do subleito, conforme Figura 3.7.



Figura 3.7. Preparação do solo destinado ao subleito

Na segunda coleta, o material foi extraído da parede de uma cava onde se retirava com extrema facilidade o que possibilitou a imediata pesagem e acondicionamento das amostras conforme Figura 3.6.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA

A maioria dos ensaios de caracterização básica dos materiais foi conduzida no Laboratório de Infraestrutura (Infralab), por sua vez os ensaios químicos e ambientais dentre outros que por ventura não ser realizados no Infralab contaram com a ajuda de outros centros acadêmicos parceiros da UnB, são eles: UFRJ/COPPE; UFC; UFG; EESC/USP; Poli-USP; o Instituto de Química e Geociências da UnB. Na Tabela 3.3 são apresentados os ensaios realizados.

Tabela 3.3. Ensaio de caracterização básica do RCD

<i>Ensaio</i>	<i>Norma</i>
Caracterização	
Análise granulométrica	NBR 7181 (1984e)
Limites de liquidez e plasticidade	NBR 6459 (1984a); NBR 7180 (1984d)
Massa específica	NBR 6508 (1984c); DNER ME 194 (1998c);
Absorção e massa específica de agregado graúdo	DNER ME 081(1998b)
Abrasão Los Angeles	NBR 6465(1984b); DNER ME 035(1998a)
Índice de Forma	DNER ME 086 (1994c)
Compactação de solos	NBR 6457 (1986a); NBR 7182 (1986b)
ISC (Índice de suporte Califórnia)	NBR 9895 (1987); DNER ME 049 (1994a)

3.3 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Nos últimos anos, os estudos vêm mostrando a importância de se considerar o efeito da repetição das cargas que atuam no pavimento. Assim, progressivamente o ISC vem sendo substituído pelo Módulo de Resiliência (MR), parâmetro necessário para aplicação dos métodos de dimensionamento mecânicos.

Por motivos práticos e/ou de custo, na sua grande maioria dos projetos ainda utiliza-se o índice ISC para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Considerada como referência e adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), esta metodologia vem sendo largamente utilizada nos projetos rodoviários brasileiros. No entanto, por ser um método que não assume o real comportamento do material em campo, o emprego do ISC no dimensionamento tem demonstrado algumas limitações.

A partir da década de 60, como expõe Preussler (1986) e constatado por Medina *et al.* (1986), observa-se uma tendência nos critérios de dimensionamento de considerar o pavimento como uma estrutura composta por um sistema de múltiplas camadas e analisar seu comportamento à luz da teoria da elasticidade e do método dos elementos finitos, com objetivo de avaliar as respostas de tensão e deformação da estrutura.

Com a adoção dessa “nova” metodologia propiciou-se o crescimento da demanda para a obtenção dos parâmetros elásticos como o módulo de resiliência e de resistência, dos materiais envolvidos na composição do pavimento. Essa nova abordagem mecânica trouxe como contribuição uma melhor otimização do dimensionamento do pavimento a partir da adoção de parâmetros de resistência e módulos.

A campanha de ensaios foi realizada com base nos procedimentos da AASHTO T307-99 (*Standard method of test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*) e na utilização de corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os ensaios aqui conduzidos foram feitos no Infralab (Laboratório de Infraestrutura) utilizando uma prensa triaxial cíclica da ELE/IPC Global, mostrada na Figura 3.8. No entanto, é necessário seguir algumas etapas metodológicas para confecção e posterior realização do ensaio como ilustra a Figura 3.8, na qual se pode observar o molde tripartido necessário para confecção do corpo de prova (a). Em seguida, foi realizado o procedimento de compactação (b) e desmolde (c e d) do corpo de prova e por fim a realização do ensaio na prensa triaxial cíclica da ELE/PC (e).

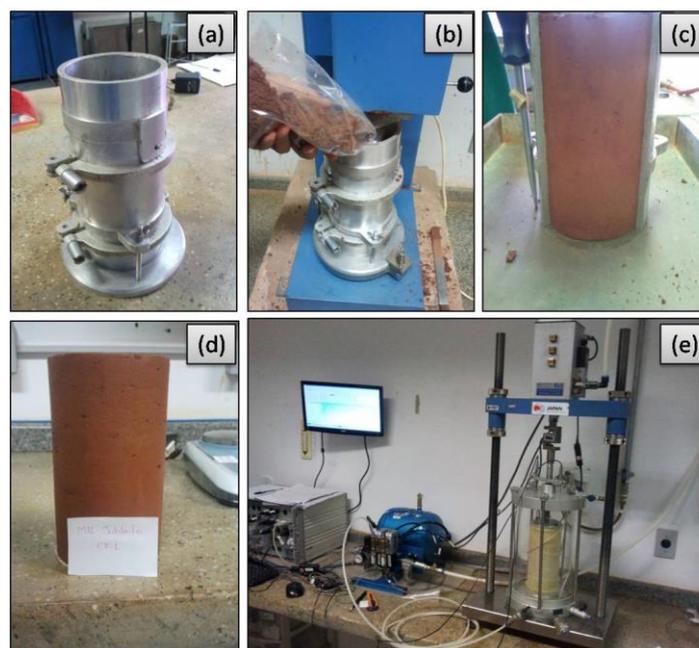


Figura 3.8. Etapas para realização do ensaio de módulo de resiliência

Cabe aqui ressaltar que a norma americana de ensaio AASHTO T 307/99 que padroniza a metodologia de obtenção do Módulo de Resiliência (MR) dos diversos materiais constituintes do pavimento, a partir de ensaios triaxiais de carga repetidas, divide os pares de tensões aplicados no ensaio de acordo com o material ensaiado. Esse procedimento metodológico da AASHTO T 307/99 visa representar melhor o estado de tensões do material de acordo com a camada onde ele é empregado.

Assim, para cada solo o módulo de resiliência poderá ser expresso como uma função do estado de tensões aplicado durante o ensaio, a partir da utilização de modelos matemáticos com constantes experimentais (MEDINA & MOTTA, 2005). Para a pesquisa em questão tanto para o material de base (RCD-R) e de subleito (solo argilo siltoso) foram utilizados o modelo Composto e o modelo Universal.

O modelo composto, descrito por Macêdo (1996), é dado pela Eq. (3.1), a seguir:

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

onde MR = Módulo de resiliência; σ_d = Tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$); σ_3 = Tensão confinante; k_1, k_2 e k_3 = Coeficientes de regressão.

O modelo universal publicado na versão do AASHTO GUIDE (2002) e proposto por Uzan (1985) é dado a seguir, pela Eq. (3.2):

$$M_R = K_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{K_3} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

onde MR = Módulo de resiliência; τ_{oct} = Tensão de cisalhamento octaédrica

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \left(\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \right)$$

θ = tensão volumétrica;

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

p_a = pressão atmosférica;

σ_1 = tensão principal maior;

σ_2 = tensão principal intermediária;

σ_3 = tensão principal menor;

k_1, k_2 e k_3 = coeficientes de regressão.

3.4 MODELO FÍSICO

O principal objetivo desta pesquisa é a investigação do material, agregado reciclado, em condições de serviço. Dessa maneira, utilizou-se um modelo físico de verdadeira grandeza que simula a estrutura do pavimento a qual foi submetida a carregamentos cíclicos. Trabalhar em um modelo de verdadeira grandeza em geral, é uma boa alternativa para a análise do comportamento de pavimentos, especialmente pelo fato de que este pode simular, por meio de condições controladas em laboratório condições de serviço dos materiais utilizados na estrutura do pavimento projetada, o que em condições de campo, tornaria a análise muito mais complexa.

A caixa para elaboração do modelo físico será a caixa de ensaio (com dimensões de 1,6 m x 1,6 m e altura de 1,2 m), onde Antunes (2008) desenvolveu pesquisa referente a reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos (Figura 3.9).



Figura 3.9. Vista da caixa de ensaio com a face lateral aberta utilizada por Antunes (2008)

O modelo físico tornou possível a avaliação de uma estrutura típica composta por uma camada de revestimento, base e subleito. Essa estrutura, por sua vez, esteve limitada a condições de tráfego cujo número “N” estará entre 10^6 e 5×10^6 . As camadas foram devidamente instrumentadas com células de carga, medidores de deslocamento.

Antes de partir diretamente para elaboração do modelo físico, foram efetuadas análises experimentais da metodologia a ser empregada na construção do modelo físico de forma a simular a condição real do processo de construção. Para camada de base e subleito, as quais

serão compactadas por meio de um “sapo mecânico”, foi construída uma caixa experimental de madeira de 1,20 m x 1,20 m e 0,30 m de altura (Figura 3.10) para avaliar o número de passadas realizadas para se atingir um grau compactação de no mínimo 95% da energia Proctor normal para a camada de subleito e de no mínimo 95% da energia Proctor modificada para camada de base.



Figura 3.10. Caixa experimental de madeira.

Inicialmente, toda caixa foi revestida por lona plástica para evitar a aderência do solo a superfície da caixa e facilitar o processo de desconstrução da camada. O solo já devidamente preparado era umedecido e misturado com auxílio de uma betoneira, por fim despejado no interior da caixa onde era nivelado por toda superfície da caixa.



Figura 3.11. Construção da camada experimental de subleito.

Durante a compactação das camadas experimentais, procurou-se estabelecer as mesmas condições de execução utilizadas para construção das camadas do modelo físico. Para o controle de compactação da camada de subleito foi estabelecido como critério de parada a obtenção da espessura final da camada compactada, ou seja, foi efetuado o cálculo da massa

necessária (aproximadamente 340 kg de solo contando com 5% de perda de material) para confecção de uma camada de 15 cm. Assim, ao chegar aos 15 cm, eram parados os procedimentos de compactação.

A Figura 3.12 a seguir ilustra o procedimento de compactação seguido ao longo desta pesquisa, o qual se compactou a camada inicialmente pela extremidade da caixa e em seguida o centro da caixa, para uma melhor uniformidade dos bordos também se utilizou um pilão de concreto e para regularização da superfície, antes segunda passada do compactador, a superfície foi escarificada com uma enxada e com auxílio de uma régua de nível o material foi nivelado.



Figura 3.12. Procedimento de compactação da camada de subleito

Depois de compactada a camada, foi feito o controle de compactação segundo a metodologia do frasco de areia (ABNT NBR 7185) e, de maneira complementar, a calibração do densímetro elétrico (*H-4114C Electrical Density gauge da Humboldt*) que foi utilizado para fazer o controle de compactação do modelo físico, conforme ilustra a Figura 3.13.



Figura 3.13. Procedimentos de controle da compactação

3.4.1 METODOLOGIA DE MONTAGEM DO ENSAIO

Como colocado anteriormente, o modelo físico foi construído em uma caixa com dimensões de 1,6 m x 1,6 m e altura de 1,2 m (Figura 3.14). Na caixa, compactou-se uma camada de subleito com altura de 30 cm de solo argiloso proveniente da movimentação de terra da construção do novo prédio da engenharia Florestal da Universidade de Brasília e outra de 29 cm com o solo proveniente do campo experimental do PPG-UnB. Contudo, a ideia inicial era ter uma camada subleito de 60 cm de espessura, porém se observou que a última camada de subleito comportou-se como uma sub-base, como será demonstrado adiante. Para camada de base, se empregou o agregado reciclado utilizado na pesquisa. Para camada de revestimento, utilizou-se uma mistura asfáltica do tipo CBUQ faixa C fornecida e pela empresa PAV-Six.

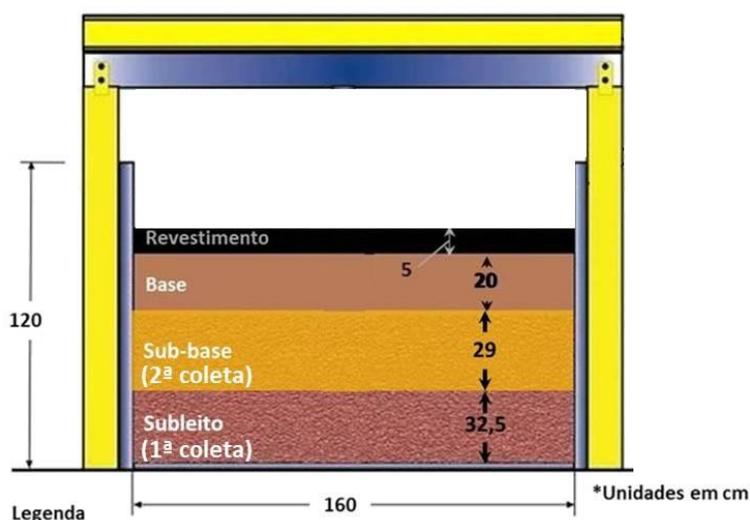


Figura 3.14. Esquema idealizado para o modelo físico de verdadeira grandeza (Adaptado de ANTUNES, 2008)

De posse de todos os materiais e instrumentação devidamente aferida os procedimentos de montagem de ensaio seguiram as seguintes etapas:

- I. Para reduzir o efeito do atrito do solo e a parede da caixa aplicaram-se duas camadas sucessivas de filme de PVC aderidas com vaselina (Figura 3.15).

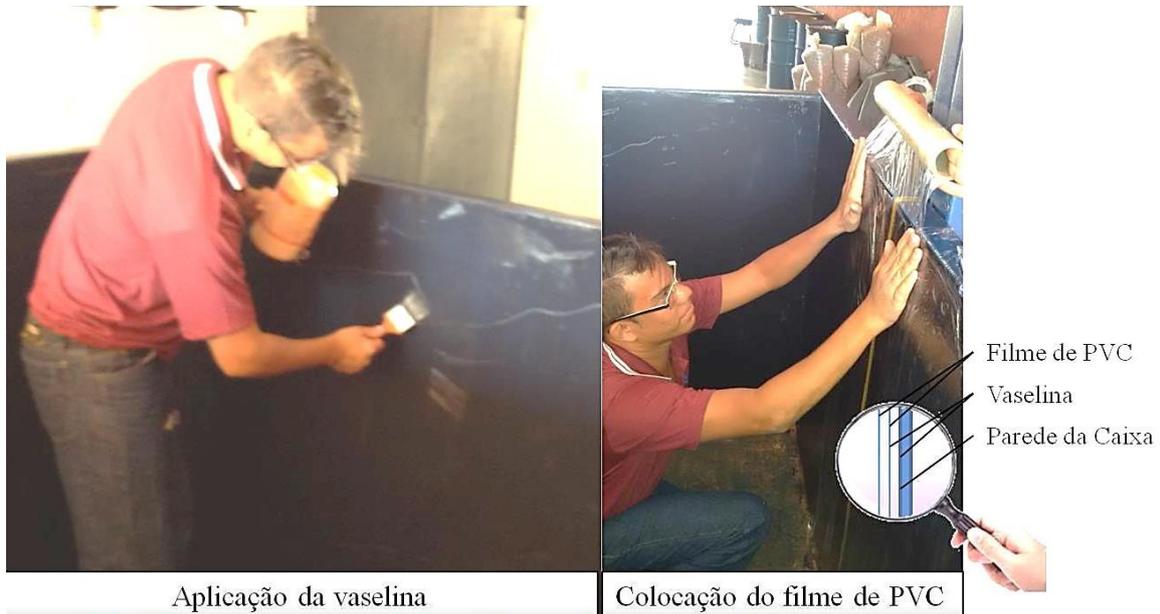


Figura 3.15. Tratamento da superfície das paredes da caixa

- II. Mistura e espalhamento do solo de subleito, instalação da instrumentação da camada de subleito (Figura 3.16) e compactação. Ressalta-se que, para o subleito foram executadas quatro camadas de 15 cm cada, sendo que nas duas primeiras camadas foram realizadas cinco leituras em pontos distintos com densímetro elétrico para controle de compactação, mas para as duas últimas o controle foi feito com o frasco de areia, haja vista que para o material dessas duas camadas o densímetro não foi calibrado.



Figura 3.16. Instalação da instrumentação na camada de subleito. (a, b, c, d) posicionamento e nivelamento da célula de tensão total, (e) definição da cota de implantação.

- III. De maneira a obter um melhor controle na execução da camada de subleito todo solo empregado (aproximadamente 2,3 ton.) foi separado em sacos plásticos de 20 kg que tinham sua umidade verificada para posterior correção. Com os valores de umidade a serem corrigidos as amostras foram misturadas com água em uma betoneira de capacidade de 120 litros até ficassem de forma homogênea e assim prontas para serem compactadas, conforme Figura 3.17.

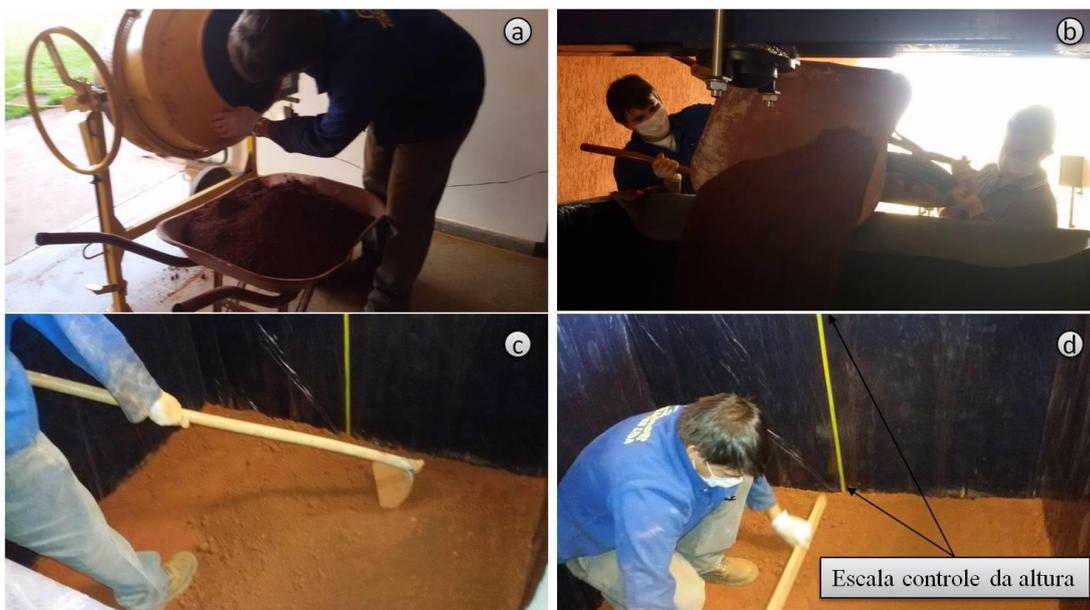


Figura 3.17. Execução da camada de subleito. (a) homogeneização do solo, (b) descarga do solo, (c) espalhamento do solo e (d) nivelamento do solo.

Para a compactação das camadas do subleito foi utilizado um compactador mecânico do tipo “sapo” da marca Petrotec, motor de 5.5 HP de potência, de 4 tempos, com sapata de 300 mm x 350 mm, peso de 75 kg, produtividade máxima indicada pelo fabricante de 660 golpes por minuto e indicado para compactação de camadas de solos granulares de até 600 mm e de 500 mm no caso de solos coesivos ou argilosos. Como feito na camada experimental do subleito, as extremidades da caixa foram compactadas com o auxílio de um pilão de concreto devido a falta de alcance do compactador mecânico. Vale ressaltar, que o ocorreu quebra do compactador durante o processo de compactação do subleito, principalmente, durante a compactação da primeira camada. Essas interrupções na compactação culminaram no trincamento da camada (Figura 3.18), por perda da umidade. Para reduzir possíveis problemas provenientes das trincas a camada foi cortada até uns 2 cm de profundidade e em seguida o material foi umedecido próximo a umidade ótima e assim compactado de forma a cicatrizar as trincas. Prevendo a possibilidade de novas interrupções da compactação e de maneira a reduzir os efeitos da perda de umidade, adotou-se o procedimento de revestir a superfície da camada com um geotêxtil não tecido e lona, previamente umedecidos, conforme Figura 3.18.

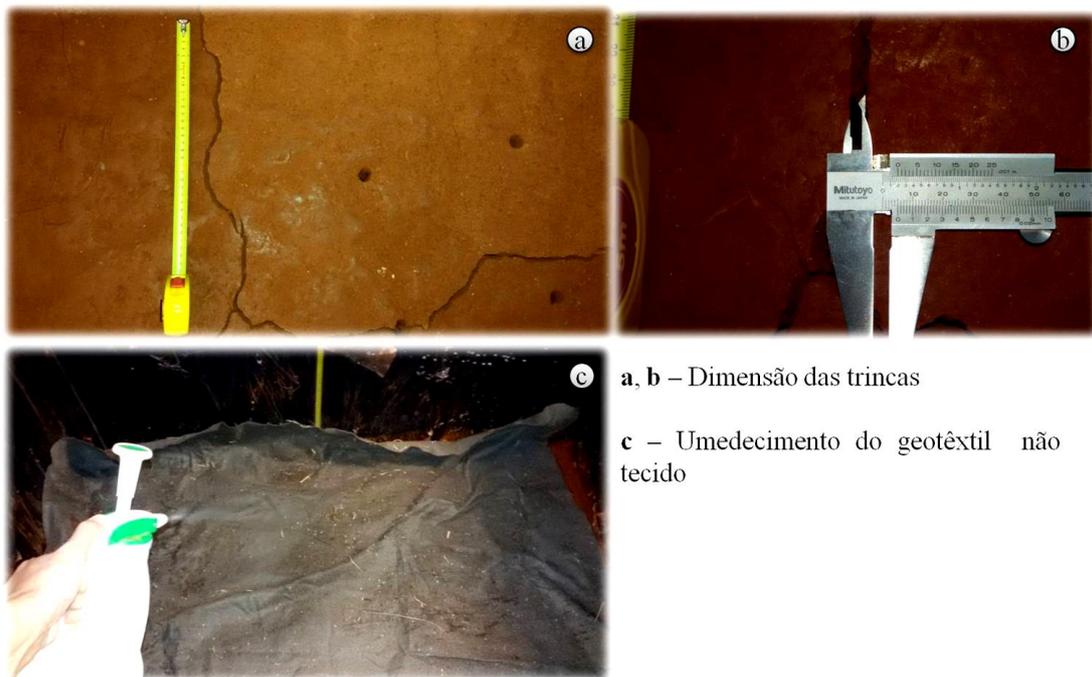


Figura 3.18. Trincamento da camada de subleito e procedimento de proteção contra perda de umidade

- IV. Mistura e espalhamento do material de base, instalação da instrumentação da camada de base e compactação. Para camada de base foram executadas duas camadas de 10 cm cada e foram realizadas leituras com o frasco de areia para o controle de compactação. Para o bom desempenho das leituras da célula de tensão total colocada na camada de base, os procedimentos de instalação seguiram as etapas descritas na Figura 3.19.



Figura 3.19. Instalação da instrumentação na transição da camada de base e subleito

- V. Para camada final de revestimento, primeiramente foi executada a imprimação da base com o uso de um pulverizador manual com asfalto diluído do tipo CM 30 fornecido pela empresa Centro Oeste Asfalto Ltda. Para um melhor controle da taxa de aplicação (0,80 a 1,60 l/m² - segundo a DNER ES 306/97) a superfície de aplicação foi dividida em segmentos iguais de 40 cm x 40 cm, como demonstra a Figura 3.20, na figura é possível observar os procedimentos de (a) limpeza da superfície da base para retirada dos materiais soltos, (b) a divisão da superfície em segmentos, (c) a aplicação do CM 30 nos segmentos e (d) o resultado parcial do procedimento de imprimação a uma taxa de 1,50 l/m².



Figura 3.20. Procedimentos de imprimação da camada de base

Após um período de no mínimo de 24 horas, para a cura da imprimação, foram executadas as etapas para confecção da camada de revestimento do tipo CBUQ faixa C sendo esse produzido com agregado calcário. Optando pela aquisição do concreto asfáltico (CA), por motivos práticos pela impossibilidade de produção em laboratório, coletou-se aproximadamente 310 kg de CA na usina da empresa PAV-Six localizada a 16 km do laboratório de Infraestrutura na cidade satélite de Sobradinho. Prevendo possíveis retenções no tráfego que comprometessem a temperatura de compactação do CA, o mesmo foi acondicionado em uma caixa de madeira revestida internamente por chapas metálicas o que se demonstrou muito eficaz para a manutenção da temperatura do CA.

Na usina para coleta posicionou-se a caminhonete (devidamente pesada) com a caixa na caçamba e em seguida com auxílio de uma pá começou a dispor a massa asfáltica na caixa. Depois de preencher a caixa, a caminhonete foi pesada novamente para verificar o peso de CA e, assim, transportou-se o material para o laboratório para compactação da camada de revestimento. Tanto na coleta como na compactação, o controle da temperatura foi feito por meio de um termômetro infravermelho como demonstra a Figura 3.21.

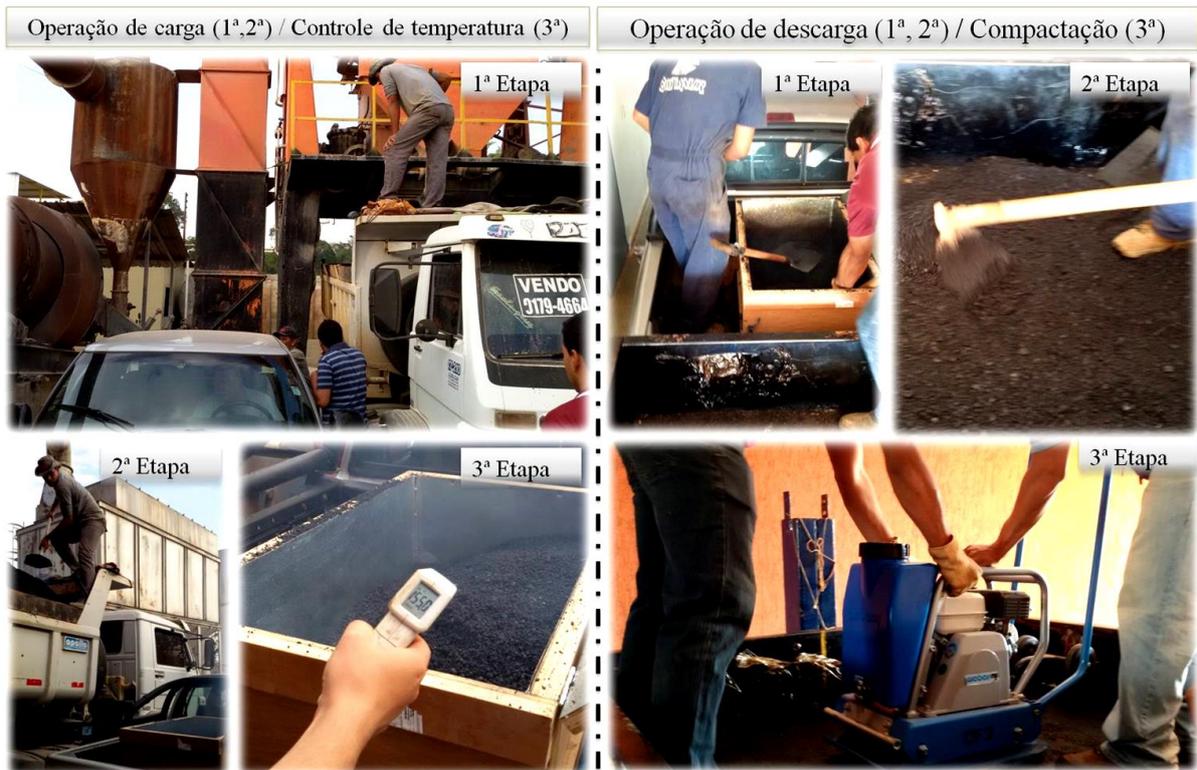


Figura 3.21. Procedimentos de execução da camada de revestimento

Na Figura 3.21 também pode ser observado os procedimentos da coleta e compactação da camada de revestimento onde se utilizou uma placa vibratória CF 2 da marca Weber MT, motor de 5.5HP de potência, de 4 tempos, com dimensões de base de 450 mm x 550 mm, peso de 80 kg, produtividade máxima indicada pelo fabricante de 660 m²/h e indicado para compactação de camadas de solos granulares, brita e asfalto com espessuras máximas de até 30 cm.

- VI. Ao finalizar a construção da estrutura do pavimento foram feitas marcações na superfície do revestimento para o posicionamento do sistema de aplicação de carga, da célula de carga e dos transdutores de deslocamento estes últimos posicionados dois sobre a placa metálica e os outros a 25 cm, 50 cm e 100 cm distantes do centro de aplicação da carga, conforme Figura 3.22.

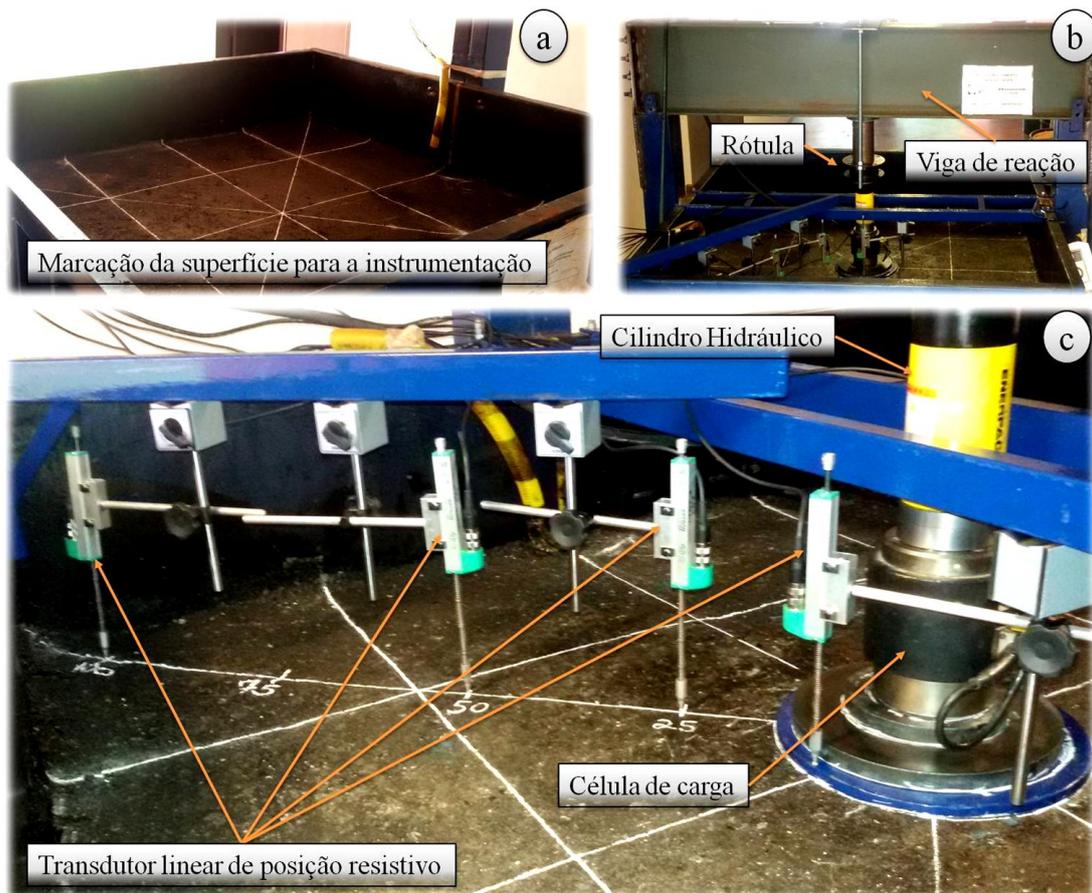


Figura 3.22. Posicionamento e montagem do sistema de aplicação de carga e instrumentação.

3.4.2 INSTRUMENTAÇÃO DO MODELO FÍSICO

A instrumentação de pavimentos é um procedimento que consiste em incorporar na estrutura do pavimento uma quantidade adequada de equipamentos e dispositivos para medir com precisão a resposta e o desempenho dos materiais que constituem o pavimento. A instrumentação é usada, principalmente, para criar, ajustar e melhorar os métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis, bem como para explorar e caracterizar os materiais utilizados para simular os mecanismos de resposta sob várias configurações de carga e meio ambiente, e para analisar a resposta e desempenho do pavimento. Não obstante, esta pesquisa usou instrumentos na estrutura de pavimento avaliada de forma a obter a resposta e o desempenho real dos materiais que compõem o modelo experimental.

Os equipamentos utilizados na instrumentação consistiram em uma célula de carga (CC) responsável pelo monitoramento das cargas aplicadas, um conjunto de transdutores lineares de posição resistivos (TLPR) que tiveram o objetivo de registrar os deslocamentos

superficiais da camada de revestimento e um grupo de células de tensão total (CTT) responsáveis por monitorar as tensões verticais transmitidas a estrutura do pavimento. O arranjo ilustrado na Figura 3.23 mostra a disposição de toda instrumentação no modelo experimental.

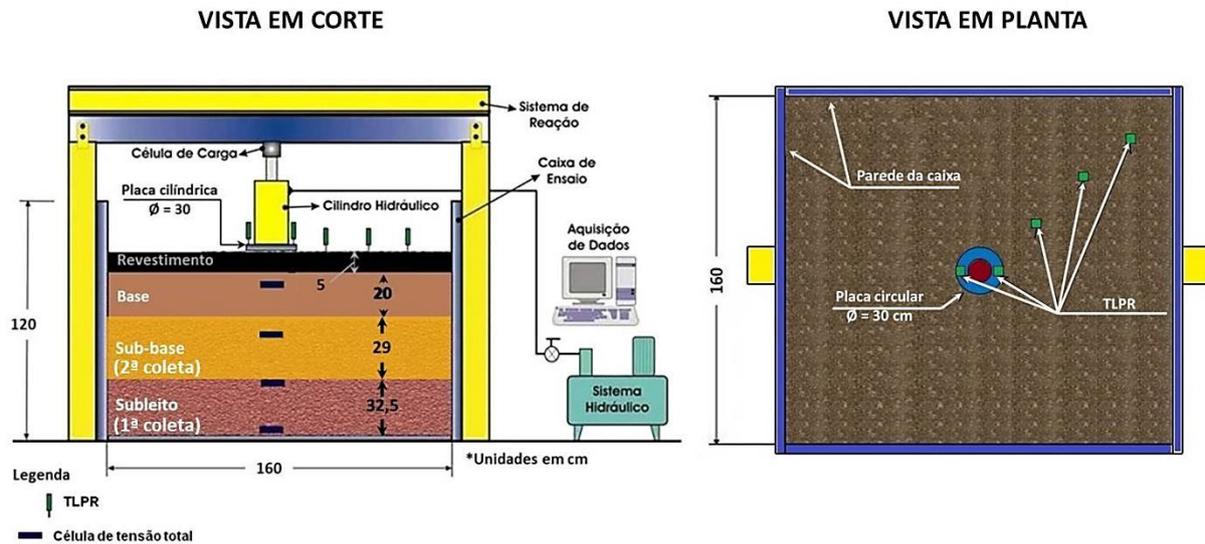


Figura 3.23. Esquema de disposição da instrumentação

Como se pode observar na Figura 3.23 para aquisição dos dados obtidos pelos equipamentos usou-se um sistema de aquisição de dados modelo ADS 2000 da empresa LYNX. Para monitoração, coleta e análise dos dados o sistema vem acompanhado do *software* AqDados 7 que é responsável por gerenciar a aquisição desses dados, por meio da instalação do mesmo em um computador.

É importante ressaltar, que para a calibração dos equipamentos se utilizou o *software* AqDados 7 no qual permite ao operador acesso a uma interface de calibração dos equipamentos, por meio de uma regressão linear onde coloca-se os valores de voltagem emitidos pelos os equipamentos e o valor de engenharia (m, kPa, kN etc...) correspondente.

A seguir são colocados os equipamentos e suas especificações:

➤ **Célula de carga:** O equipamento tem capacidade de carga máxima 10 tf cujo fabricante é a empresa Kratos equipamentos industriais Ltda. Segundo o fabricante, trata-se de um equipamento para medição de forças de tração e compressão de altíssima rigidez e resistência à cargas laterais e excêntricas, pela construção monobloco das colunas e cabeças de fixação. Equipamento similar foi utilizado por Antunes (2008) e mais de detalhes podem ser observados na Figura 3.24.



Figura 3.24. Célula de carga CCI da Kratos equipamentos capacidade 10 tf

Para calibração da célula de carga utilizou-se uma prensa da marca MTS (*Material Test System*) de capacidade igual a 100 kN do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UnB. Com o equipamento foi possível monitorar e registrar os valores de voltagem e os valores de carga aplicados na célula, conforme Figura 3.25.



Figura 3.25. Calibração da célula de carga

➤ **Transdutor linear de posição resistivo (TLPR):** Utilizado para medir os deslocamentos superficiais da estrutura e assim os afundamentos e as bacias deflexão após os carregamentos cíclicos. O equipamento fabricado pela empresa GEFTRAN (Figura 3.26) consiste em um medidor de distância linear modelo PY2 com curso elétrico útil de 100 mm.

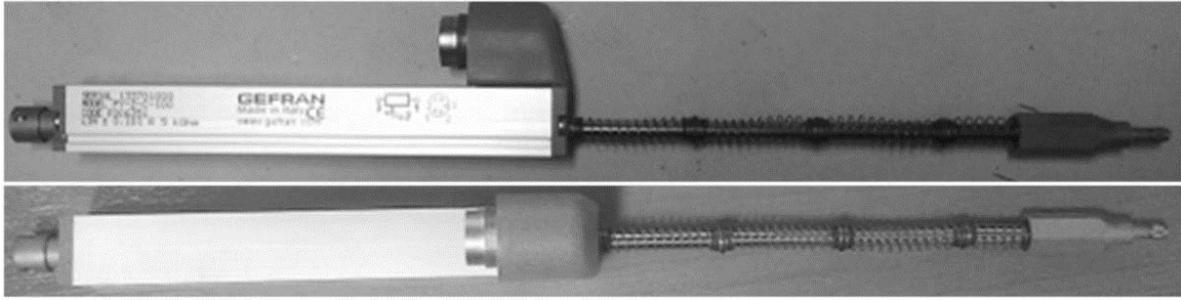


Figura 3.26. Medidor de deslocamento linear PY2 da GEFRAN curso 100 mm

Para a calibração do TLPR foi utilizado o transdutor de deslocamento linear da prensa Humboldt HM-3000.3F do laboratório de infraestrutura da Universidade de Brasília, para realização da calibração foram tomados alguns cuidados como representado na Figura 3.27.

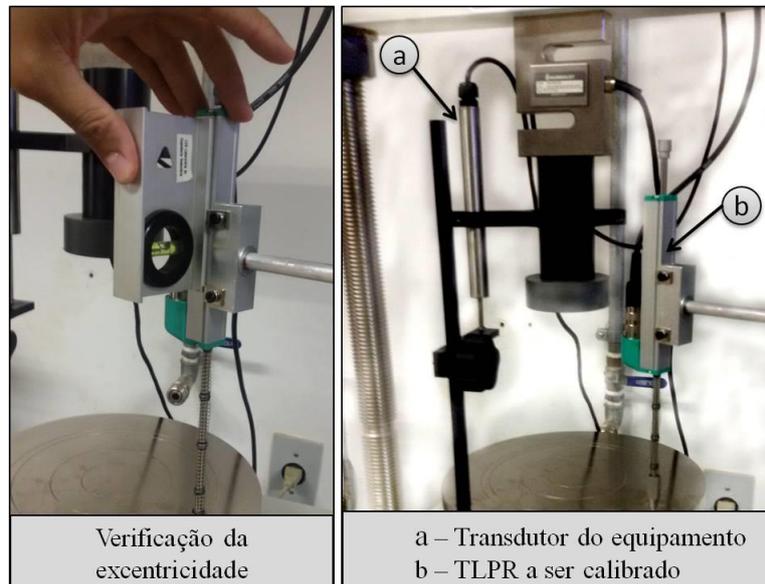


Figura 3.27. Procedimentos para calibração dos transdutores de deslocamento

➤ **Célula de tensão total:** Equipamento similar ao usado por Góngora (2011), as CTT (Figura 3.28) possuem uma capacidade máxima de 600 kPa são do tipo diafragma fabricadas pela empresa Micro Sensores Industrial com diâmetro de 75 mm, espessura de 6 mm e acurácia de 1%. Como coloca Góngora (2011), esse tipo de CTT consiste de duas placas de aço inoxidável soldadas hermeticamente em suas bordas. Mediante um espaçador, cria-se uma cavidade a qual é preenchida com óleo mineral previamente degaseificado a um nível inferior a 2 ppm, garantindo desta forma uma variação volumétrica mínima, com resposta linear e boa sensibilidade. A pressão gerada no interior da célula é medida por meio de um sensor de pressão elétrico, a base de extensômetros elétricos cujo circuito é ligado ao sistema de alimentação e de aquisição de dados.



Figura 3.28. CTT utilizada no modelo experimental

As células se destinaram a obter as tensões transmitidas para as diversas camadas do modelo o que permitiu estimar a distribuição do bulbo de tensões. Como se observa, as CTTs foram introduzidas em camadas compostas por materiais distintos ou até mesmo em regiões de transição entre camadas, isso levou a procedimentos de calibração que representassem de melhor forma as condições com as quais estas células iriam ser aplicadas.

Theroux, Labuz & Drescher (2000) elaboraram um trabalho sobre calibração de células de tensão total. No trabalho, os autores trazem os conceitos básicos de CTT, as diferenças entre os tipos, calibração mediante vários tipos de carregamentos. Dentre os aspectos mais importantes do trabalho se encontra os procedimentos e recomendações de instalação de campo de uma CTT, haja vista, que a motivação da pesquisa buscou avaliar tensões transmitidas a camada de subleito em rodovias do estado de Minnesota na cidade de Otsego, nos Estados Unidos da América. Esse projeto permitiu aos autores definirem o método mais adequado para calibração, observar a resposta das CTT quando submetidas a cargas estáticas e dinâmicas dentro de um ambiente controlado, e assim recomendar um procedimento de instalação de campo viável.

Dave & Dasaka (2013) trataram da calibração de CTT e de como a espessura e o tipo de material influencia nessa calibração. De forma geral, os autores concluíram que a calibração de CTT aplicadas em obras geotécnicas deve ser feita levando em consideração os fatores do local e/ou solo em que o equipamento vai ser empregado, o que permitirá resultados mais confiáveis. Dessa forma, os procedimentos de calibração das quatro CTT desta pesquisa seguiram os seguintes procedimentos: primeiramente, foi necessário usar um recipiente com paredes rígidas com dimensões compatíveis aos materiais empregados e que suportasse o processo de compactação dos materiais no seu interior. Usou-se uma caixa metálica com dimensões iguais a 30 cm x 35 cm x 30 cm que teve suas paredes untadas com vaselina e revestidas com um filme de PVC para reduzir a influência do atrito das partículas na parede da caixa, conforme Figura 3.29.

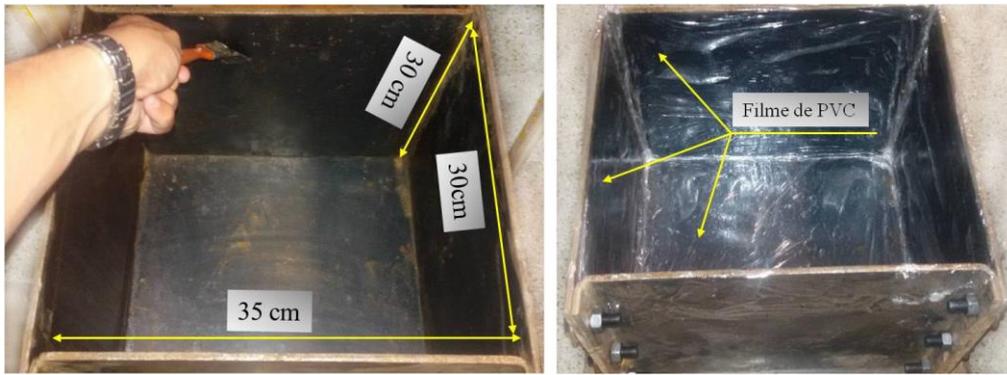


Figura 3.29. Caixa de calibração das CTT

Quanto ao controle e compactação do material no interior da caixa, procurou-se aproximar das condições em que o material seria utilizado no modelo experimental. Com o auxílio de uma placa metálica, bomba e cilindro hidráulico compactou-se as camadas por esforços de compressão, conforme a Figura 3.30.

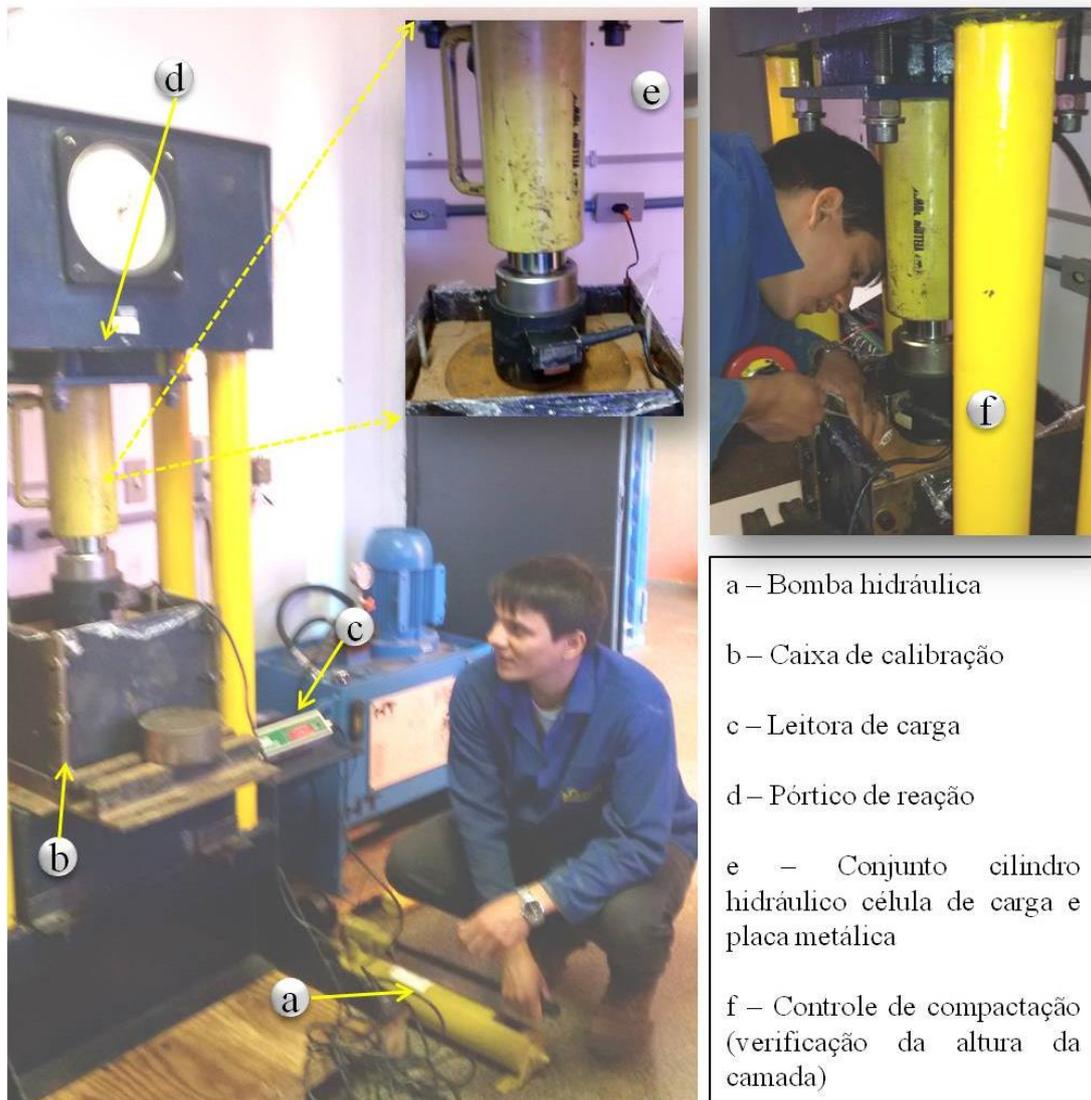


Figura 3.30. Procedimento de compactação do material para calibração das CTT

Executada a camada até a cota de assentamento da CTT, o procedimento de compactação era interrompido e a célula era posicionada e nivelada. Em seguida, fazia um novo preenchimento da caixa com o restante do material para uma nova compactação, como pode ser observado na Figura 3.31.

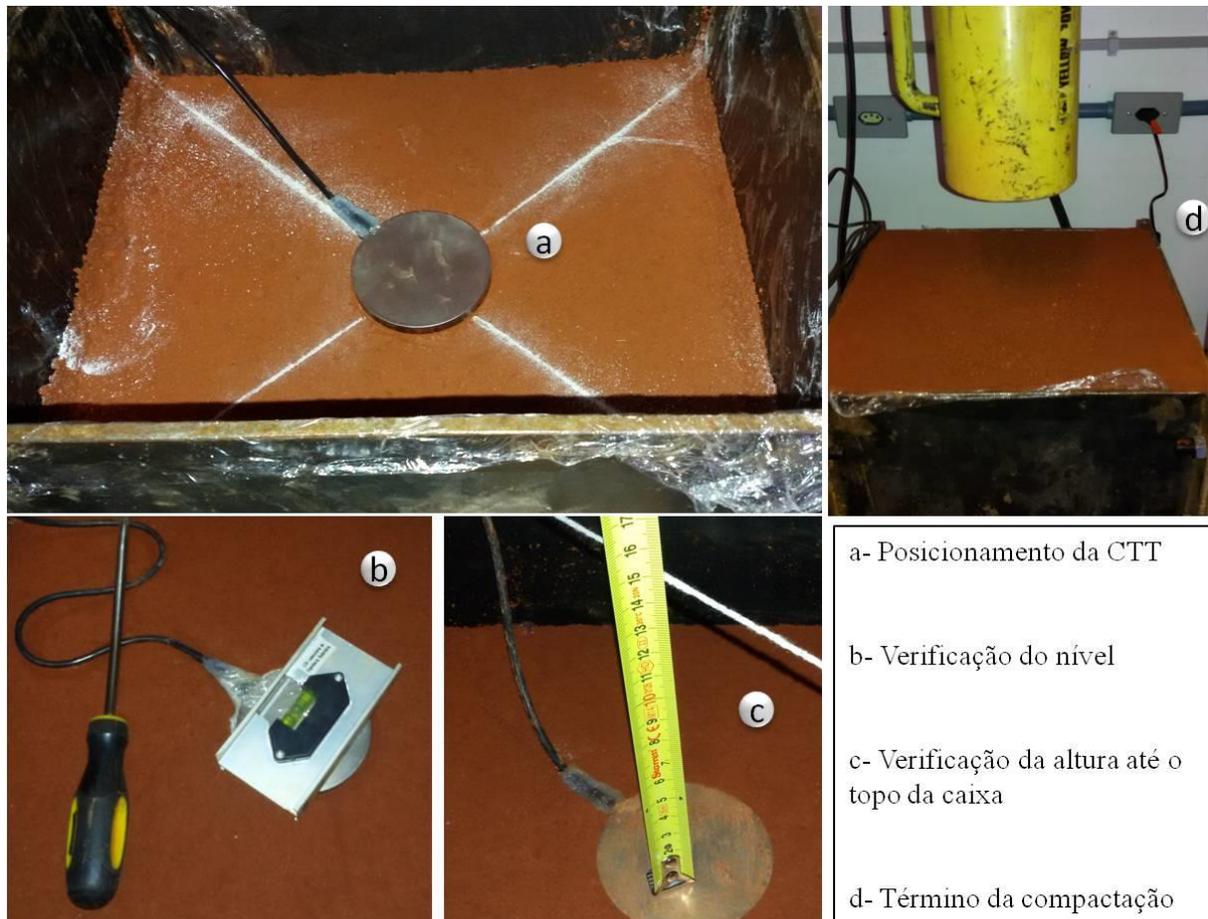


Figura 3.31. Metodologia e cuidados para o posicionamento da CTT

Por fim, posicionava-se o conjunto placa metálica e célula de carga sobre amostra e aplicava progressivamente cargas conhecidas e no sistema de aquisição de dados registrava as voltagens correspondentes aos valores de engenharia conhecidos.

Cuidados também foram adotados no que trata do uso da CTT em materiais granulares. Em condições em que a CTT fique exposta a possíveis fenômenos de arqueamentos ou concentração de tensões, o que poderia comprometer as leituras e a integridade da célula, foram feitas manobras para contornar esses efeitos. Segundo as recomendações de Dunnycliff & Green (1988) *apud* Palmeira (1996) e buscando evitar erros devido alguma excentricidade e por cargas não-uniformes ou pontuais, obedeceu-se à razão de que o diâmetro da CTT deva ser maior que 20 a 40 vezes o diâmetro do maior grão de solo.

Com base nesses argumentos durante a calibração foram efetuados os procedimentos descritos e ilustrados na Figura 3.32 abaixo:

- a- Posicionamento do tubo de PVC (diâmetro nominal de 100 mm) sobre a CTT
- b- Preenchimento do tubo com RCD passante na peneira nº 10 (2 mm)
- c- Preenchimento da caixa como RCD-R ao redor do tubo
- d- Retirada do tubo de PVC

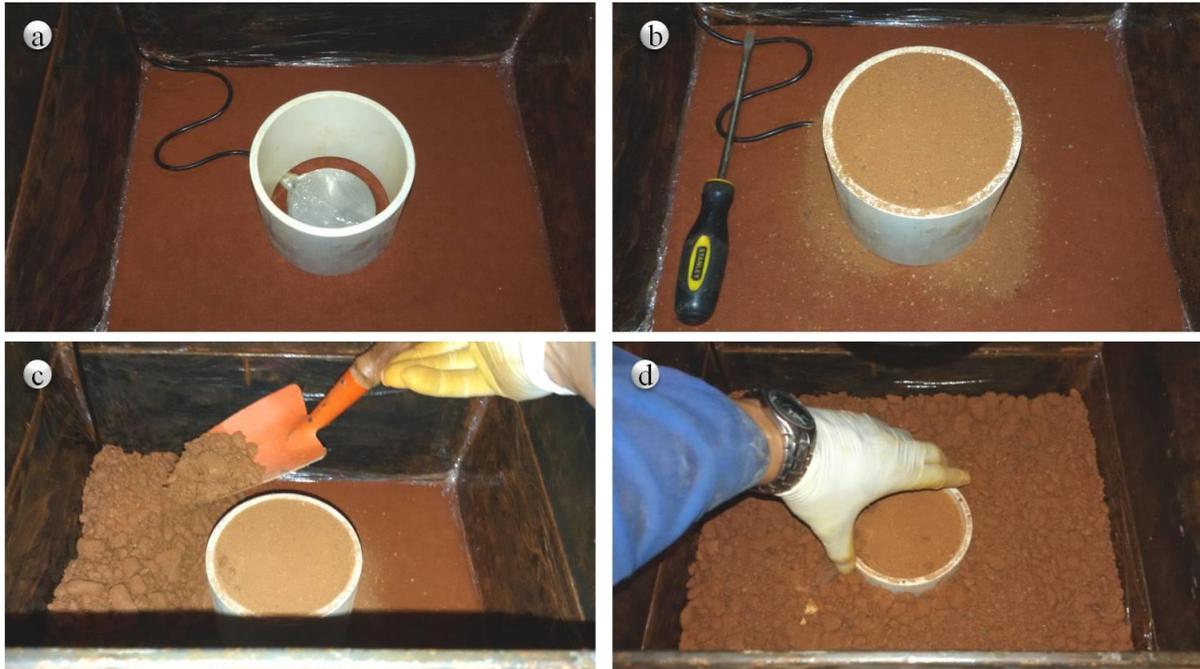


Figura 3.32. Ilustração da proteção da CTT que fica em contato com o material grosseiro

Outro ponto já observado nas pesquisas conduzidas no Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB (PPG-UnB), é a resistência das CTT na presença de umidade. Dessa forma, as conexões próximas ao corpo metálico da CTT foram protegidas com uma camada de silicone e antes de cada ensaio as células foram revestidas por uma película de proteção composta por um delgado filme de PVC que revestia a CTT por inteiro.

Levando em consideração os cuidados referentes as calibrações das CTT foram feitos arranjos para a calibração das CTT conforme seu posicionamento no modelo experimental, como ilustra a Figura 3.33.

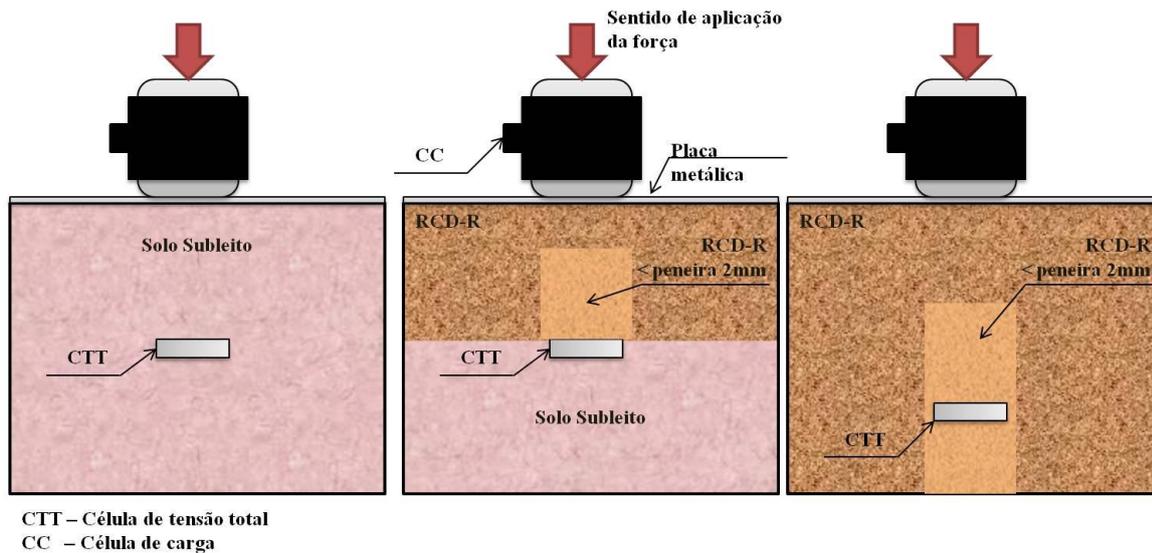


Figura 3.33. Arranjos para a calibração das células de tensão total

3.5 RETROANÁLISES

Etapa final da pesquisa, a simulação dos resultados obtidos, foi realizada para um estudo mecânico das estruturas de pavimento para análise da resposta das camadas constituídas por agregado reciclado, empregando-se os valores obtidos em laboratório e em campo. Para tanto, foi utilizado o programa PLAXIS versão 7 por tonar possível uma melhor representação das condições reais do experimento. Os primeiros resultados acerca do desempenho da estrutura foram obtidos a partir de análises lineares elásticas elaboradas no programa PLAXIS versão 7.

Para tanto as condições geométricas (espessuras das camadas e largura da caixa), os parâmetros dos materiais (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson) e os valores de carregamento foram adotadas o mais próximo possível as condições em que o modelo físico foi construído e submetido. Para um melhor entendimento desta etapa, e das análises feitas durante a pesquisa é colocada de forma esquemática na Figura 3.34 as etapas da retroanálise.

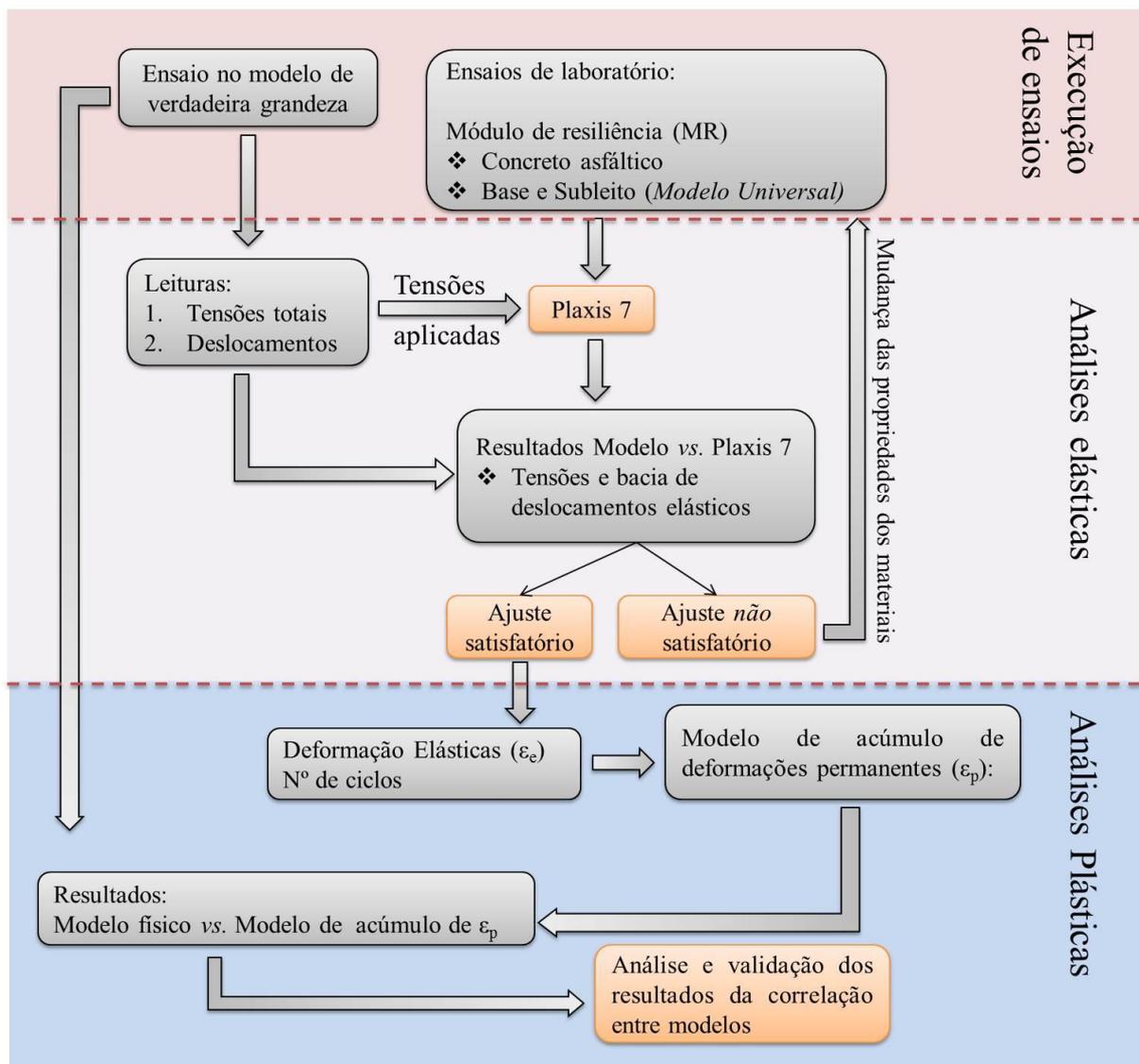


Figura 3.34. Fluxograma das análises da correlação entre o ensaio de verdadeira grandeza e modelos numéricos.

Da Figura 3.34 pode-se definir que as etapas de análise são compostas por três momentos principais interdependentes. O primeiro trata da obtenção dos parâmetros e comportamento dos materiais, o segundo corresponde aos estudos de retroanálise das tensões e bacias de deslocamento para um comportamento puramente elástico que por sua vez permite a realização do último que busca validar os modelos de previsão de deformação permanente *versus* os valores obtidos pela instrumentação do modelo físico.

As características geométricas da estrutura foram obtidas a partir dos controles de execução durante a construção do modelo, e os dados do módulo de elasticidade por meio dos ensaios experimentais. O módulo do revestimento foi considerado fixo (elástico linear), enquanto que o módulo dos materiais de base e subleito foi corrigido manualmente em

sucessivas análises com base nos parâmetros do modelo universal (k_1 , k_2 e k_3) e nas tensões geradas na análise anterior até atingir um valor constante de módulo. Esses valores correspondem a um modelo de protótipo construído nas condições ideais de granulometria, grau de compactação e umidade equivalentes aos utilizados nos ensaios de laboratório para obtenção dos módulos de resiliência. O coeficiente Poisson de todas as camadas foi fixado em 0,3. Todos os dados de entrada para as análises elásticas seguem descritos de maneira condensada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Parâmetros dos materiais do pavimento

Materiais	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Peso específico (kN/m³)	Espessura (cm)
Revestimento (CBUQ - faixa c)	1800	0,30	24,00	5,3
Base (RCD)	144,5	0,30	23,30	20,0
Subleito (2ª coleta A)	37,5	0,30	18,12	14,5
Subleito (2ª coleta B)	39,9	0,30	18,12	14,5
Subleito (1ª coleta A)	40,8	0,30	18,83	15,3
Subleito (1ª coleta B)	49,4	0,30	18,83	17,2

Com esses dados iniciais de módulo foram executadas retroanálises a partir dos valores tensão e deslocamentos elásticos registrados pela instrumentação do modelo físico. Dessa forma, o processo de retroanálise consistiu em ajustar o melhor comportamento em termos de deslocamentos e tensões obtidos com o programa PLAXIS-7 aos valores da instrumentação.

Entretanto, com os valores de módulo corrigidos e para um melhor discernimento acerca de qual modelo axissimétrico representaria melhor às condições de ensaio avaliou-se dois casos, conforme as dimensões apresentadas na Figura 3.35. A partir dos dois casos e considerando a hipótese da aderência entre a camada de concreto asfáltico (CA) e a parede do modelo físico foram efetuadas também análises alterando as condições de contorno somente na face lateral do revestimento próxima a parede.

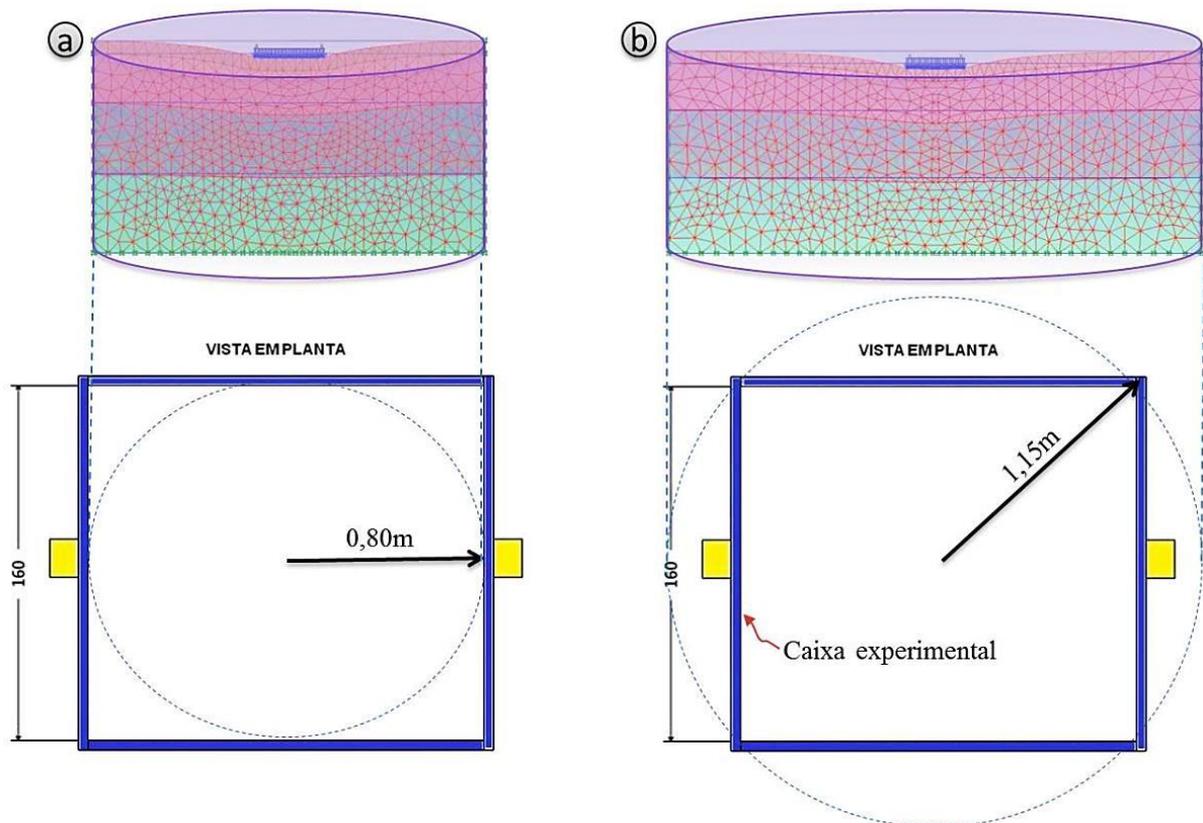


Figura 3.35. Casos axissimétricos considerados nas análises

Devido ao posicionamento da instrumentação (transdutores de deslocamento) ter sido feito na diagonal da caixa experimental, o caso (b), com raio igual 1,15 m, se tornou uma opção mais plausível para as análises dos deslocamentos superficiais. Por outro lado, para o caso (a) cujo domínio de análise está limitado às dimensões internas da caixa experimental permitiu a avaliação da influência da parede mais próxima ao ponto de aplicação de carga.

CAPÍTULO 4

Apresentação e Análise dos Resultados

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados na construção do modelo físico, assim como os resultados do comportamento estrutural do pavimento flexível construído com camada de base de RCD-R.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO RCD-R

Dos ensaios de separação granulométrica e catação observa-se que o RCD-R utilizado na pesquisa é composto por 57,9% de agregado graúdo e 42,1% por materiais finos (fração < 4,75 mm). Observou-se ainda, conforme Figura 4.1, que os materiais cimentícios (concreto e argamassa) dão a maior contribuição na composição do RCD chegando a 40,1%, seguido de materiais pétreos com 15,6%, e em menor percentagem encontram-se os materiais cerâmicos vermelhos e contrapisos com valor 1,5% e 0,5% cada, e as cerâmicas brancas com 0,2%. A percentagem de materiais contaminantes foi de apenas 0,1% e que dentro do material contaminante quantificado não foram encontrados amianto e gesso.

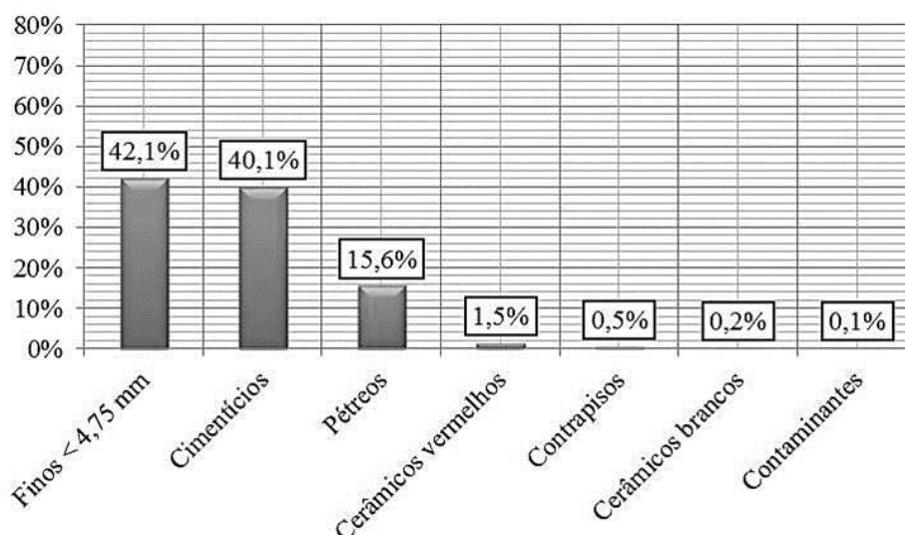


Figura 4.1. Materiais que constituem o RCD

Para classificação do material de acordo com a NBR 15116 (2004d) faz-se necessário a definição somente dos percentuais acima da peneira de malha 4,75 mm que são passíveis de serem identificados pelo processo de catação. Assim, para o material ser classificado como agregado de resíduo de concreto (ARC), conforme a NBR citada, o somatório de materiais cimentícios e pétreos deve ser maior ou igual a 90%; abaixo desse limite o material é classificado com agregado de resíduo misto (ARM). Ao avaliar a Figura 4.2, na qual são apresentados somente os percentuais dos materiais retidos acima da peneira de malha 4,75 mm observa-se que a soma dos materiais cimentícios e pétreos perfazem 96,2%, o que caracteriza o material como ARC.

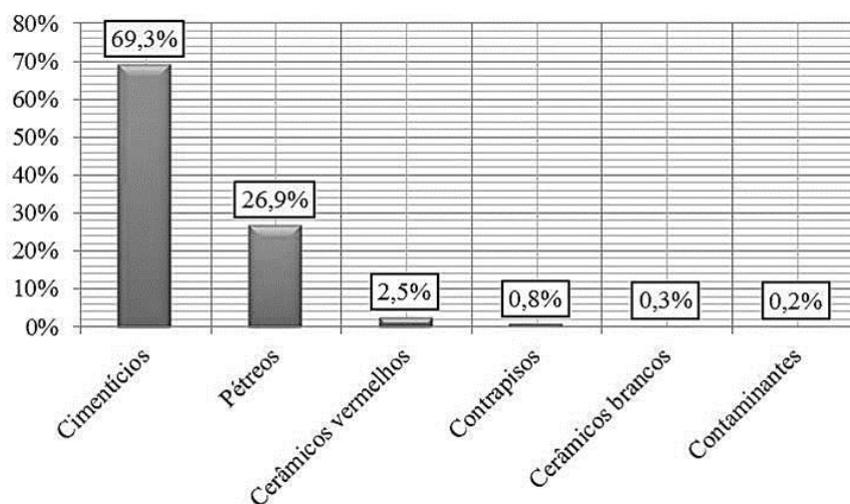


Figura 4.2. Composição do RCD-R sem considerar a fração materiais finos (< 4,75 mm)

A distribuição granulométrica do RCD-R resultante do segundo processo de britagem é apresentada na Figura 4.3. A curva granulométrica média foi obtida a partir da realização de 27 campanhas de ensaio que representaram o comportamento heterogêneo do material. No entanto, a curva se aproximou de forma razoável, para o interior das faixas C, para Base quanto para CBUQ, estabelecida pela norma DNIT 141/2010 – ES (Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente).

Tendo-se em conta a quebra de grãos esperada conforme estudado por Gómez (2011) optou-se em trabalhar com a curva média. Dois motivos contribuíram para a escolha: primeiro, após a compactação a curva sofre uma correção deslocando-se para o interior das faixas devido a quebra de grãos; segundo, diferente da pesquisa de Gómez (2011) que adotou uma granulometria mais grossa (correspondente ao limite superior da Faixa C para base) optou-se em trabalhar com o material obtido diretamente após o processo de britagem com o intuito de aproximar os estudos experimentais à realidade prática.

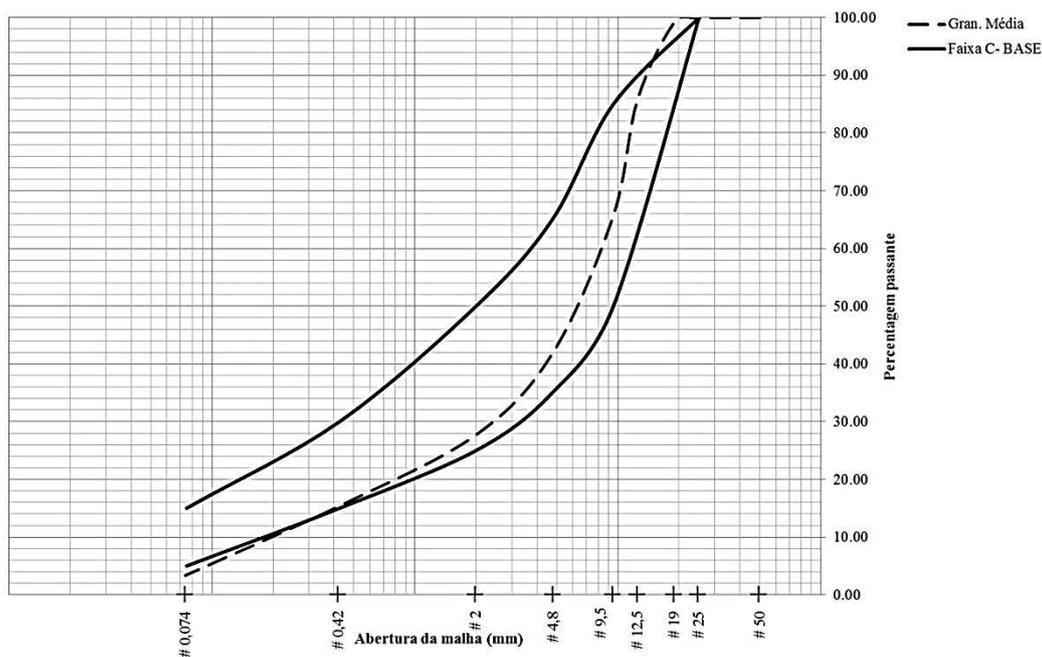


Figura 4.3. Distribuição granulométrica do RCD-R *versus* Faixa C para Base.

Da curva granulométrica é possível retirar algumas conclusões, ao efetuar um cálculo médio dos coeficientes de curvatura (C_c) e de uniformidade (C_u) representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores de coeficiente de curvatura e uniformidade

<i>Parâmetros</i>	C_u	C_c
<i>Média</i>	37	3
<i>Desvio padrão</i>	9	1
<i>n</i>	27	27
<i>Graus de liberdade</i>	26	26
<i>Nível de Significância</i>	95%	95%
<i>t (Student)</i>	1,706	1,706
<i>Mínimo</i>	35	3
<i>Máximo</i>	40	4

A distribuição *t* de *Student* é uma ferramenta estatística que possibilita determinar, a partir das médias aritméticas e dos desvios padrões, os limites superior e inferior dos conjuntos de pontos amostrais obtidos para os coeficientes de curvatura e uniformidade. Valores acima ou abaixo desses limites são excluídos por não pertencerem ao mesmo espaço amostral. Assim, observa-se que o valor médio do C_u pertence ao espaço amostral e o C_c encontra-se no limite inferior. A partir desses resultados, conclui-se que o material se comporta de maneira não uniforme e é bem graduado.

Ao analisar os resultados a luz da NBR 15115 (2004d) percebe-se que o material se enquadra nos limites $C_u \geq 10$ colocados em norma. A NBR 15115 (2004d) não faz referência ao C_c . Assim, utilizaram-se aqui os limites do C_c que deve se encontrar entre 1 a 3. Ao colocar as frações granulométricas conforme a Tabela 4.2, verifica-se que o material atende também os limites exigidos pela NBR 15115 (2004d) em relação a porcentagem passante na peneira N°40 (0,42 mm) que deve estar entre 10% e 40%, tendo se obtido 15,3%.

Tabela 4.2. Frações granulométricas do agregado reciclado

Fração	ABNT N°	Abertura (mm)	Porcentagem média passante (Acumulada)	Porcentagem média Retida
Pedregulho	2"	50	100,0	0,0
	1"	25	99,9	0,1
	3/4"	19	99,2	0,7
Areia	1/2"	12,5	85,8	13,3
	3/8"	9,5	65,8	20,1
	N° 4	4,8	42,0	23,7
	N° 10	2	27,7	14,3
	N° 40	0,42	15,3	12,4
	N° 200	0,074	3,4	12,0
Silte & Argila		Fundo	0,0	3,0

Para a fração menor que 0,074 mm, geralmente responsável por aferir aos materiais utilizados em pavimentação um comportamento “ativo”, devido à fração argila, a pesquisa conduziu de forma cautelosa avaliações como ensaios de limites de Atterberg e Equivalente de Areia, apesar do material atender o limite permissível colocado pela NBR 15116/04, como comprovado por Gómez (2011).

Após a caracterização granulométrica, foram efetuados os ensaios de densidade (DNER – ME 081/98 e DNER – ME 084/95), massa específica (DNER-ME 195/97 e DNER – ME194/98), absorção (DNER – ME 081/98), abrasão Los Angeles (DNER – ME 035/98), equivalente de areia (ABNT NBR 12052/92), índice de forma (DNER – ME 086/94) e adesividade (DNER - ME 078/94), todos os resultados são resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Caracterização agregado reciclado (AR)

Ensaio		Resultado	Unid.
Densidade aparente das partículas sólidas	AR graúdo	2,270	-
Massa específica aparente	AR miúdo	2,440	g/cm ³
Limites de Atterberg	W _L	32	%
	W _P	S/ resultado	
	IP	NP	
Absorção		7,6	%
Abrasão Los Angeles		35	%
Equivalente de areia		74	%
Índice de forma		0,9	-
Adesividade (AR Graúdo)		Ruim	-

Comparando os valores obtidos na caracterização física do RCD-R com valores reportados na literatura para agregados naturais, é possível observar que o resíduo apresenta valores similares ou superiores aos mínimos requeridos pelas normas de materiais para construção de pavimentos.

Como relação a característica de adesividade entre o AR graúdo e o ligante asfáltico, em alguns pontos essa característica demonstrou-se ruim, geralmente em partículas de cerâmicas vermelhas e brancas, o que pode ser creditado às faces polidas do material e a sua composição, conforme descreve Quiñones (2014). Outra característica do RCD-R que contribui para a má adesividade é seu alto valor de absorção o que conduz para um maior consumo de ligante asfáltico quando este for aplicado para composição de uma mistura asfáltica. O resíduo por possuir uma superfície com textura mais rugosa e ter em sua composição materiais cimentícios (de maior superfície específica) necessita mais que 3,5 % de ligante dos prescritos por norma, para que o mesmo seja recoberto pela película asfáltica. Com base nessa alta absorção, Silva (2009b), ao acrescentar 2,5 % a mais na quantidade de ligante definida por norma, obteve resultados de adesividade satisfatórios.

Um dos pontos mais importantes descritos em inúmeras pesquisas é o valor de absorção do material, visto que o alto valor de absorção do material implica de forma direta no teor de água a ser adicionada na compactação. A título de comparação um agregado calcário tipicamente utilizado no Distrito Federal que tem absorção em torno de 0,8 % ao contrário dos 7,6 % encontrada para o agregado reciclado.

Conforme se demonstra na Tabela 4.4 o valor de absorção é variável dependendo diretamente da sua composição e origem, como comprovado por Proença *et al.* (2012) quando

estudaram a absorção de maneira separada para cada tipo de material. Os pesquisadores demonstram que a absorção varia e aponta para um alto valor de absorção quanto mais presente são as parcelas de argamassa (10,4 %) e cerâmica vermelha (13,3 %). De forma complementar, os autores colocam os valores de absorção das parcelas de concreto (6,4 %) e da parcela mista – cerâmica vermelha mais argamassa (11,3 %).

Tabela 4.4. Valores de absorção e composição de diversos tipos de RCD

Fonte	Absorção (%)	Composição do material									
		Cimentícios	Pétreos	Cerâmicos vermelhos	Contrapisos	Misto	Cerâmicos brancos	Telha de amianto	Outros	% passante < 4,8 mm	Contaminantes
Leite (2001)	5,0	43,44	29,84	26,33	-	-	-	-	0,39	-	-
Vieira et al. (2004)	6,0	47,00	-	48,00	-	-	3,00	-	2,00	-	-
Motta (2005)	7,8	41,87	23,75	4,34	-	-	3,42	0,32	-	26,31	-
Oikonomou (2005)	3,0	40,00	-	30,00	-	-	-	-	-	-	30,00
Leite (2007)	12,2	55,30	11,80	15,90	-	-	13,50	-	-	-	3,50
Gómez (2011)	7,67	41,99	41,41	14,45	0,90	-	0,95	-	-	0,30	0,00
Proença <i>et al.</i> (2012)	6,4 a 13,3	46,00	-	34,00	-	11,00	-	-	-	5,00	4,00
Pesquisa Atual	7,6	40,10	15,60	1,50	0,50	-	0,20	-	-	42,10	0,10

Quando o AR de resíduo de construção civil é utilizado para camada de revestimento, ou seja, aplicados na composição de misturas asfálticas, uma alta absorção de água é um indicativo de possível aumento do consumo de ligante asfáltico, embora a absorção do ligante seja bem menor devido à alta viscosidade deste material. Assim, além de diminuir problemas relativos à deformação permanente, os ligantes mais viscosos são mais indicados para utilização quando se utiliza agregados como característica de absorção elevada. Especificamente, citam-se os asfaltos modificados com borracha moída de pneus os quais apresentam alta viscosidade com impacto positivo na vida de fadiga e deformabilidade das misturas. Uma vantagem adicional, investigada por Farias *et al.* (2012), é que a borracha residual absorve parte da energia das solicitações externas e reduz a quebra de grãos característica do RCD.

Por sua vez, quando o AR de resíduo de construção é utilizado para camada de base, uma alta absorção do agregado, 7,6% como a que foi determinada nesta pesquisa, implica de forma direta no teor de água a ser adicionada na compactação e, conseqüentemente, na trabalhabilidade desse material em campo, o que se pode traduzir em uma dificuldade de controle dos parâmetros de compactação.

Por fim, ao analisar os resultados de abrasão Los Angeles e índice de forma, comprovam-se excelentes valores desses índices do material em relação aos critérios prescritos. Ao considerar as especificações brasileiras que limitam o desgaste a abrasão de materiais utilizados em base ($< 55\%$) e revestimento ($< 40\%$) e o índice de forma ($> 0,5$), observa-se que o material atende facilmente os limites, demonstrando a competência do material ao desgaste e uma boa cubicidade.

4.1.1 AGGREGATE IMAGING SYSTEM (AIMS)

Prevendo a mudança física do agregado reciclado quando submetido a compactação para construção de camadas de base, foram efetuados novos estudos em conjunto com a Universidade Federal do Ceará (UFC) de maneira a caracterizar melhor as características físicas do agregado reciclado. Para tanto, utilizou-se um novo equipamento adquirido pela UFC, conhecido como AIMS (*Aggregate Imaging System*), Figura 4.4, que torna possível a análise de forma, angularidade e textura de agregados graúdos e angularidade e forma de agregados miúdos.



Figura 4.4. Equipamento AIMS (*Aggregate Imaging System*)

O principal motivo pelo uso do sistema se baseia na eficiência de captação e obtenção dos resultados em relação aos métodos comumente empregados na prática como: índice de

forma (por paquímetro ou por crivos), método de determinação de partículas alongadas e achatadas (com o emprego do aparelho de proporcionalidade, Caliper).

De maneira geral, a metodologia empregada no AIMS, por pautar-se em bases estatísticas, apresenta os dados e/ou resultados no formato de uma distribuição. Essa distribuição acumulada, por sua vez, permite a definição das características da amostra de agregados ensaiada, além de estabelecer índices médios de suas características.

A lamelaridade é um parâmetro geométrico que determina se os componentes dos agregados são alongados ou não. Esse parâmetro relaciona a maior razão existente entre o comprimento (maior diâmetro do agregado) e a largura (maior diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado), ou entre a largura e a espessura (menor diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado) (BESSA, 2010). Geralmente, a norma utilizada para determinação, em laboratório, da lamelaridade de agregados graúdos é a ASTM D 4791/99. Essa norma requer a utilização de um tipo de paquímetro dimensional (Caliper) que determina as razões entre os diâmetros de uma determinada partícula de agregado. Cada agregado deve ser medido separadamente, a partir de uma amostra representativa recomendada pela norma. De acordo com a mesma, os agregados podem ser classificados como: (i) planos, (ii) alongados ou (iii) planos/alongados, dependendo das relações entre suas dimensões.

Como critério específico para o uso dos agregados em misturas asfálticas, as especificações Superpave estabelecem que as partículas alongadas e planas, indesejáveis para uso, são aquelas que apresentam porcentagem em massa de agregado graúdo, com razão entre suas dimensões máxima e mínima, valores maiores ou iguais a 5. Dessa maneira, como descreveram Bernucci *et al.* (2006), deve-se garantir que ocorra um limite máximo de 10% de agregados planos/alongados na produção de misturas asfálticas para pavimentos com volume de tráfego médio a alto ($N > 3 \times 10^6$).

Conforme descrito, o equipamento AIMS por processamento digital de imagens também define a razão entre as dimensões do agregado, e expressa os resultados conforme a Figura 4.5.

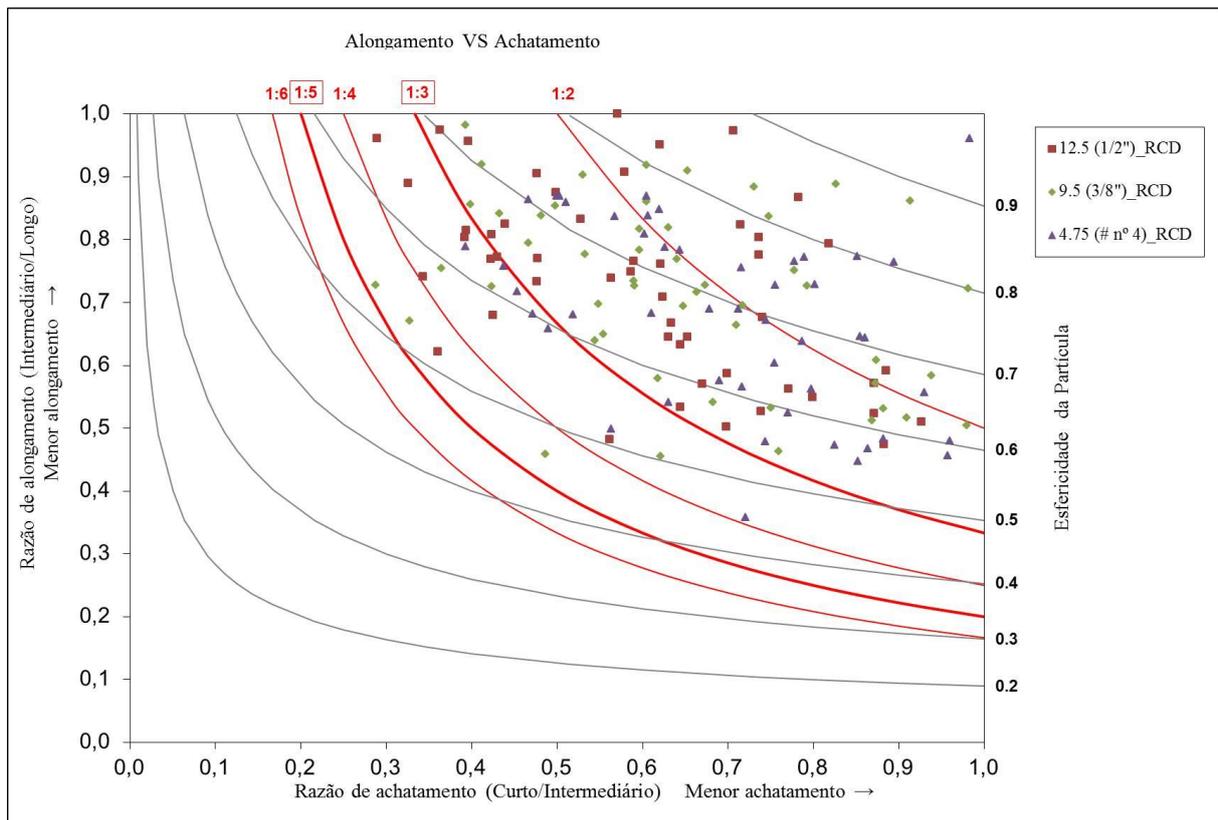


Figura 4.5. Gráfico das razões de alongamento e achatamento do agregado reciclado

Ao analisar os resultados é possível concluir que as razões dos agregados analisados são menores do que 1:5, o que é desejável. Somando-se a isto, por apresentarem partículas com dimensões mais equidimensionais, tendem a ser mais cúbicas conforme se observa na Figura 4.5.

A cubicidade das partículas, por sua vez, pode ser definida a partir do índice de forma, cujo procedimento de ensaio para determinação deste índice é estabelecido na norma DNER-ME 086/94 na qual se pode definir o índice de forma como um parâmetro adimensional que varia entre 0 e 1, levando-se em conta que agregados com índices próximos a 1 possuem ótima cubicidade e que agregados com índices próximos a 0 possuem baixa cubicidade, ou seja, são mais lamelares do que esféricos. A metodologia Superpave recomenda que os agregados de uma mistura asfáltica devam possuir índice de forma igual ou maior a 0,50. Os resultados obtidos para o RCD de acordo com esta norma forneceram índice de forma excelente igual a 0,9.

Ao analisar os resultados encontrados para o índice de forma, segundo a norma DNER-ME 086/94, colocados na Tabela 4.3 e os resultados estabelecidos na Figura 4.6 a seguir, obtidos por meio do equipamento AIMS, observa-se que ambas as metodologias

comprovam que o agregado reciclado tem um alto grau de cubicidade com praticamente todas as partículas com valores entre 0,5 e 0,9 para distribuição do AIMS, ou seja, alta cubicidade. O valor médio de distribuição é de 0,7 para o índice de cubicidade, todavia, ressalta-se que esse índice tem definição e medição distinta do índice de forma da norma DNER-ME 086/94.

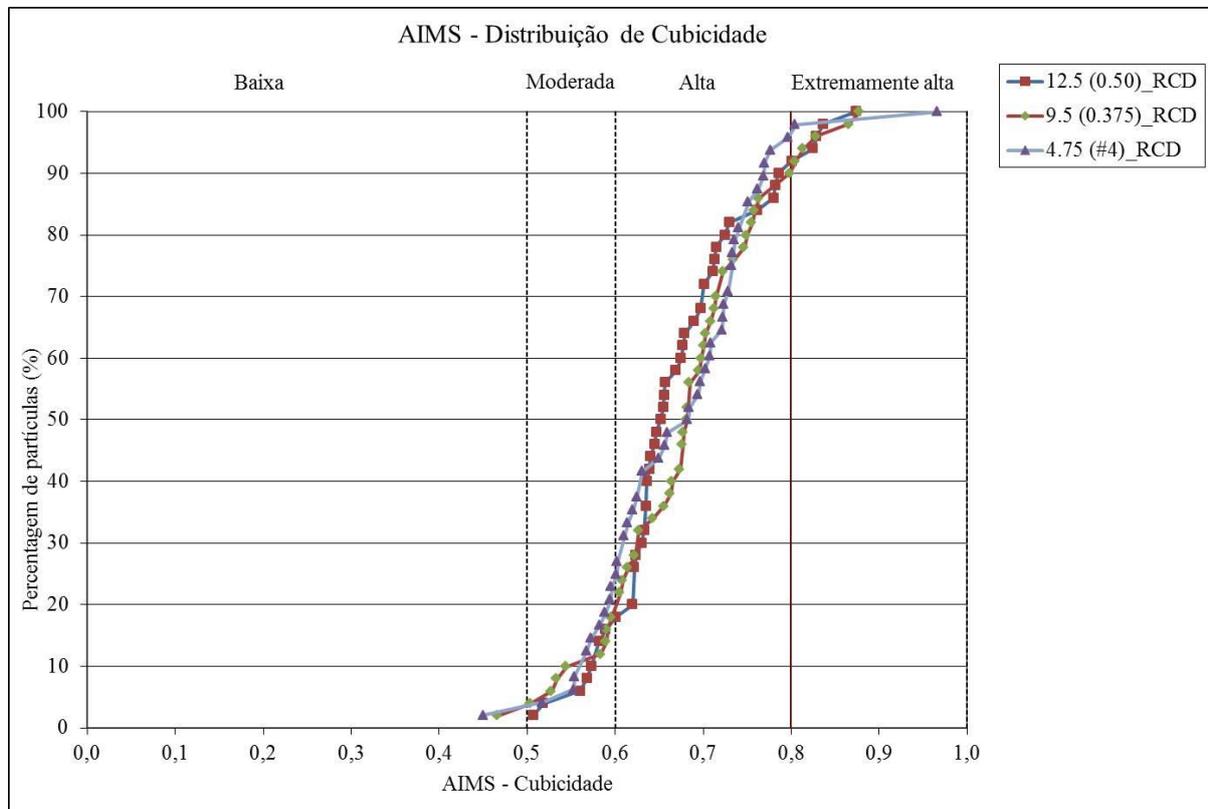


Figura 4.6. Gráfico de distribuição de cubicidade do agregado reciclado

Enquanto a metodologia da norma DNER-ME 086/94 se fundamenta na passagem das partículas do agregado por crivos circulares e redutores para a obtenção do índice de forma, pelo AMIS a determinação da forma se baseia em processamento digital de imagens, a partir da definição das dimensões (espessura, largura e comprimento) das partículas, por meio de um microscópio de focagem automática se mede a profundidade das partículas, ao passo que as projeções bidimensionais são analisadas usando análises de autovetores para determinar os eixos principais.

Portanto, são esperados benefícios no comportamento das misturas asfálticas confeccionadas com o agregado reciclado, haja vista que misturas com agregados de forma mais cúbica promovem uma melhor aderência pneu pavimento; melhor trabalhabilidade durante a mistura e um maior entrosamento entre as partículas o que gera menores deformações permanentes.

Já como material para camada granular do pavimento, ao analisar os resultados anteriores, partículas equidimensionais ou angulosas, traduz em materiais com melhor comportamento mecânico.

Por fim, os outros parâmetros de textura e angularidade definidos por meio do AIMS demonstram características desejáveis para adoção do agregado reciclado em misturas asfálticas e como materiais de base. Na Figura 4.7 e Figura 4.8, observa-se que o material apresenta níveis de textura e angularidade variando de moderada a alta.

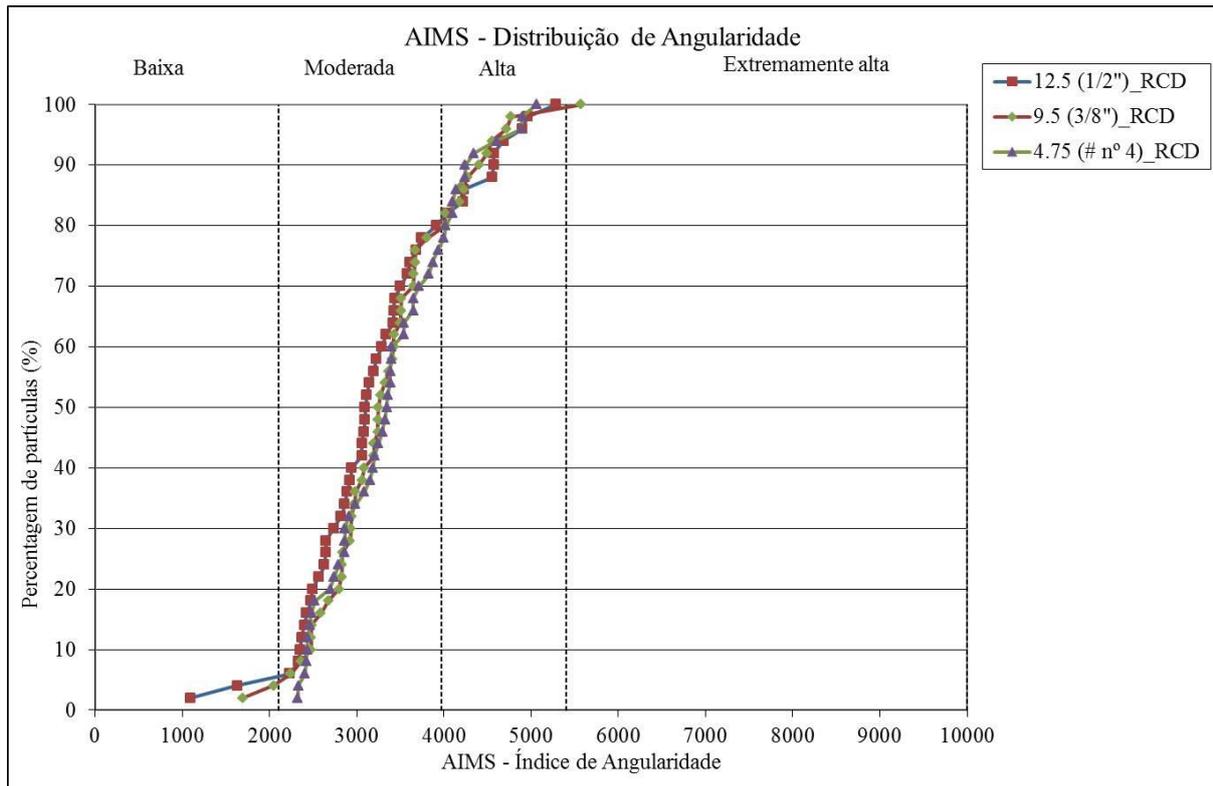


Figura 4.7. Gráfico de distribuição de angularidade do agregado reciclado

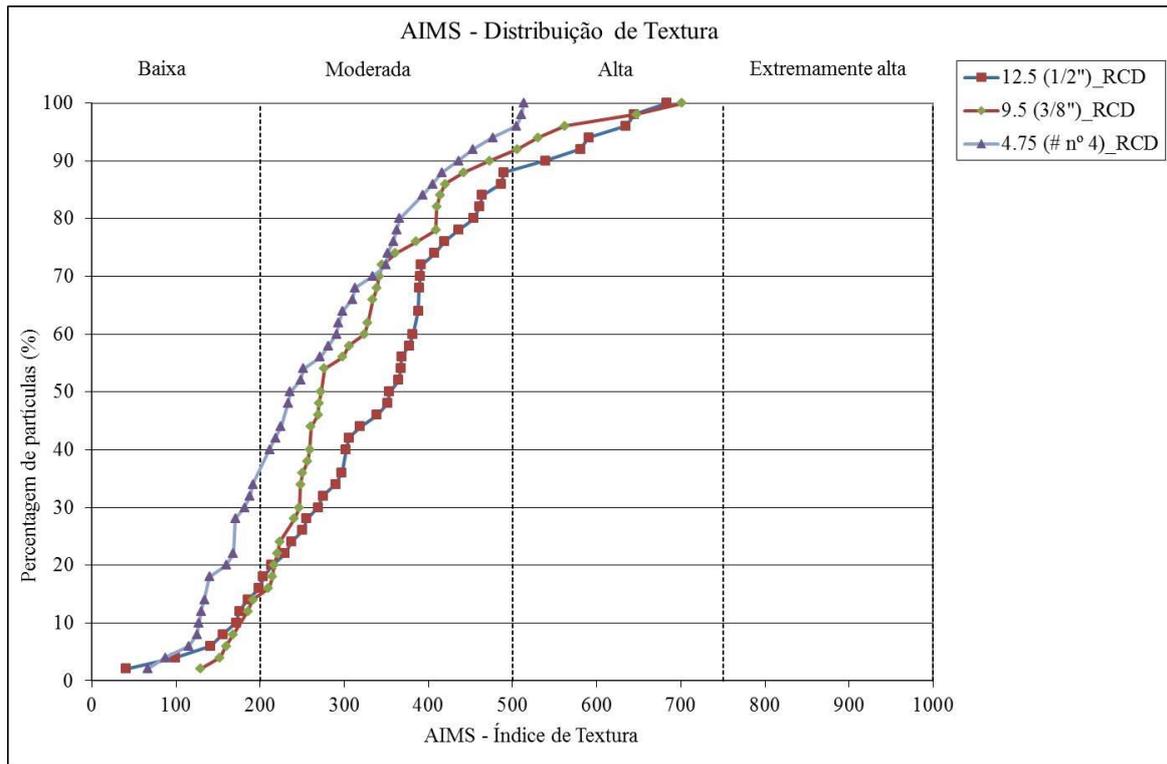


Figura 4.8. Gráfico de distribuição de textura do agregado reciclado

Entende-se por angularidade a característica associada ao grau de agudez dos cantos ou arestas dos agregados e a textura como a rugosidade de sua superfície, conforme Figura 4.9. Então, verifica-se que o agregado reciclado apresenta níveis de textura e angularidade que fomentam um melhor intertravamento e atrito interno entre as superfícies das partículas.

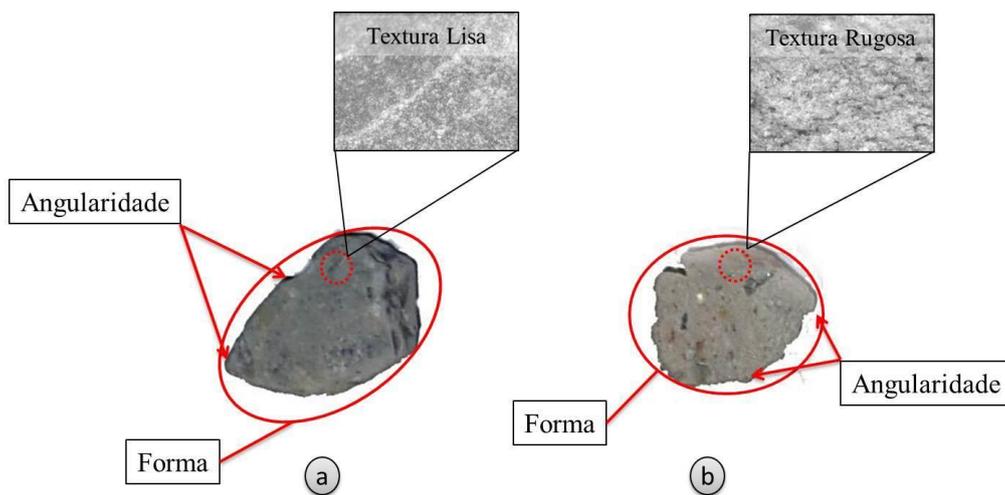


Figura 4.9. Características físicas do agregado reciclado, (a) partícula de agregado calcário e (b) concreto, respectivamente.

Assim, os resultados obtidos para as amostras de agregado reciclado servirão para esclarecer o comportamento do agregado e verificar a sua vocação quando empregado em

revestimentos confeccionados a partir de misturas asfálticas e de um grande indicativo de bom comportamento mecânico do AR quando aplicado em camada de base compactada.

4.1.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

A definição da energia de compactação foi vinculada à camada de destino final do resíduo. Como foi prevista a utilização do material em camadas de base, passou-se a analisar as amostras à luz da norma DNIT 141/2010-ES. Na referida norma, define-se como sendo a Proctor modificado, a energia utilizada para ensaios de compactação aplicados a materiais destinados a camada de base.

A pesquisa atual e a de Gómez (2011) definiram a umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo. As pesquisas somaram para a avaliação do comportamento mecânico do resíduo que serviu para a definição do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima a ser adotado para elaboração da camada de base a ser construída para o modelo físico de verdadeira grandeza.

Com o ensaio de compactação realizado durante esta pesquisa e com os resultados obtidos a partir da pesquisa citada anteriormente foi possível definir uma curva de compactação (Figura 4.10) do material a partir de uma linha de tendência. Curva esta, obtida por meio do cálculo da média dos valores de umidade e peso específico aparente seco proveniente da pesquisa atual e de Gómez (2011). Pode-se notar a ausência das curvas de saturação na Figura 4.10 devido à dificuldade em determinar valores de G_s para o material, devido à heterogeneidade do resíduo.

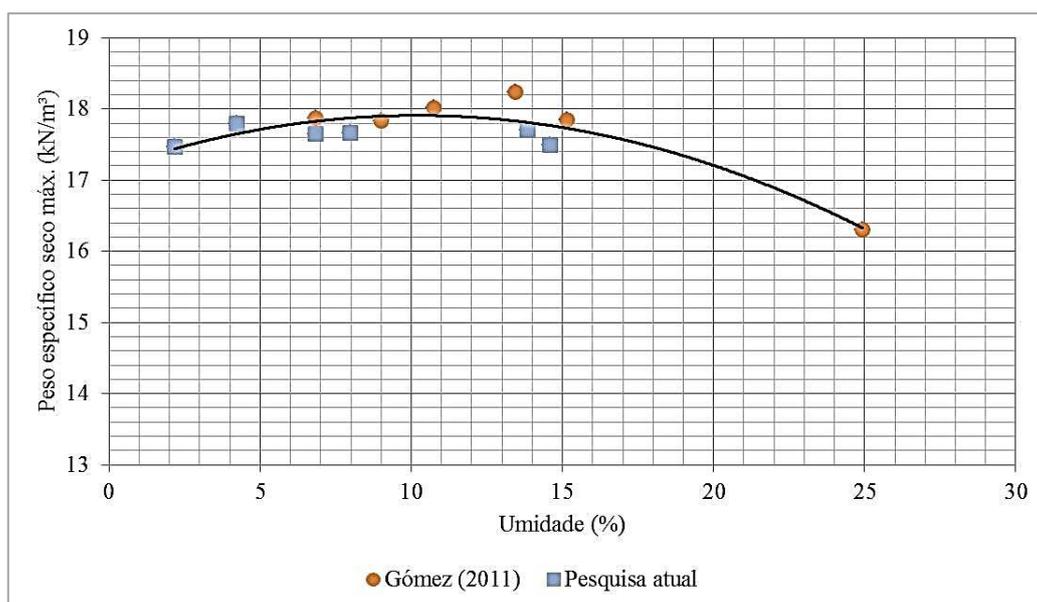


Figura 4.10. Curva de compactação obtida para energia modificada

Como constatado por Gómez (2011) é possível verificar que o agregado reciclado não apresenta o comportamento convencional de um solo natural quanto à forma da curva de compactação. O que se observa é uma nuvem de pontos sem uma definição clara de uma curva. No entanto, ao traçar uma linha de tendência através dos pontos médios foi possível a definição de um valor de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo correspondentes a 11% e 18,1 kN/m³, respectivamente.

Observa-se que a curva de compactação é achatada e o teor de umidade não influi significativamente na definição do peso específico aparente seco máximo do material. Porém, empiricamente, é observada uma visível melhora na trabalhabilidade do material até um teor de umidade de 14 %, acima desse valor ocorre a saturação do material e a expulsão de água, conforme observado na Figura 4.11.



Figura 4.11. Aspecto do agregado reciclado com a variação da umidade após compactação.

Por não permitir uma definição precisa de um pico na curva de compactação que permitisse estabelecer valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo foi utilizado como critério a trabalhabilidade para definição dos referidos pontos. Assim, optou-se por trabalhar com uma umidade ótima de 13 % e um peso específico aparente seco máximo de 18,05 kN/m³, que além de serem justificados por motivos de trabalhabilidade também vão dar sequência a linha de pesquisa desenvolvida a partir do trabalho de Gómez (2011) no qual a autora fez o uso da umidade de 13 % para confecção dos seus corpos de prova para execução dos ensaios de módulo de resiliência e Índice de Suporte Califórnia.

4.1.3 ENSAIOS DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Como observado no ensaio de compactação, o comportamento do material das amostras durante esta pesquisa foi semelhante ao comportamento encontrado durante a pesquisa de Gómez (2011), mesmo adotando-se processos distintos de confecção das amostras. Seguindo esta vertente, foram realizados ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) para a nova condição de amostragem, ou seja, material obtido diretamente após o processo de britagem.

Ao estabelecer os critérios das normas NBR 15115 e NBR 15116 quanto à utilização do agregado reciclado em camadas de reforço de subleito (ISC > 12%), sub-base (ISC > 20%) e base (ISC > 60%), para rodovias de tráfego leve, observa-se que há um horizonte promissor na utilização do material, já comprovado por inúmeras pesquisas e também validado durante a pesquisa de Gómez (2011). Assim, os resultados encontrados para o material como será visto adiante, permitem a sua utilização em camadas de base tanto para volumes de tráfego com $N \leq 5 \times 10^6$, como para locais com $N \geq 5 \times 10^6$ por apresentarem valores de ISC superiores a 80%. Por interesse específico, ou seja, confecção de camadas bases, esta pesquisa procurou incorporar somente os resultados de ISC realizados em amostras compactadas na energia modificada provenientes da pesquisa de Gómez (2011).

Dos resultados encontrados pode-se observar na Tabela 4.5 que o desempenho do material supera os valores exigidos em norma, tanto para às condições sem e com imersão, além de apresentar valores nulos de expansão.

Tabela 4.5. Resultados de ISC para amostras compactadas na energia modificada (GÓMEZ, 2011)

Teste	Sem imersão			Com imersão (após 96 horas)			
	ISC (%)	ω (%)	γ_d (kN/m ³)	ISC (%)	ω (%)	γ_d (kN/m ³)	Exp. (%)
Amostra 1	140	13	17,5	247	13	17,4	0
Amostra 2	173	13	17,7	197	13	18,3	0
Amostra 3	175	13	18,9	210	13	18,9	0
Média	163	13	18,0	218	13	18,2	0
Variância	386	0	0,57	673	0	0,6	0
Desvio Padrão	19,7	0	0,8	25,9	0	0,8	0

Outro comentário interessante acerca dos resultados, é que se esperavam resultados de ISC inferiores para as amostras submetidas à imersão. No entanto, o resultado demonstra um acréscimo na resistência à penetração do cilindro padrão, possivelmente devido às novas reações de hidratação do material fino cimentício que durante o processo de imersão

promoveu um acréscimo de resistência. Todavia, deve-se salientar que o material possui um comportamento bastante complexo devido sua heterogeneidade, o que não permite a princípio assumir que a tese, referente ao ganho de resistência devido à presença de materiais cimentícios, seja tomada como verdade.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO

A camada de subleito proposta vem conferir uma particularidade bem próxima aos pavimentos construídos na região do Distrito Federal onde há presença características da “argila porosa de Brasília” (solos lateríticos). Este material, devido a sua alta porosidade e tipo de ligações cimentícias, apresenta uma estrutura altamente instável quando submetida a aumento de umidade e/ou alteração do estado de tensões, apresentando quase sempre uma variação de volume, denominada colapso (MOTA, 2003).

Contudo, apesar de apresentar este comportamento negativo, quando submetido a esforços de compactação este material apresenta rigidez suficiente para interagir com a estrutura do pavimento como constatou Batista (2007). A autora avaliou metodologias para determinação dos parâmetros de deformabilidade das camadas constituintes de um pavimento executado no Distrito Federal no ano 2006 (duplicação da via L3 Norte), sendo o subleito do trecho composto por solos lateríticos os quais segundo a autora apresentaram módulos de Young variando entre 187,2 a 161,4 MPa quando determinados a partir do ensaio de *GeoGauge*.

Na Figura 4.12 mostra-se a curva granulométrica do solo utilizado para construção da camada de subleito do modelo físico de verdadeira grandeza, os resultados indicam um comportamento típico de solos lateríticos que sofreram uma intensa evolução pedogênica. Nesses solos, as partículas argilosas se organizam na forma de agregações de argila, e estes “grãos de argila” sem a presença do defloculante vão se comportar como grãos de areia, definindo assim uma curva granulométrica típica da areia. Quando se usa o defloculante, os grumos argilosos são desagregados, a curva granulométrica abre toda a faixa de materiais finos e o material analisado apresenta um comportamento argiloso.

Ao aplicar a metodologia de classificação proposta pela NBR 6502, o solo pode ser classificado como sendo uma areia siltosa com vestígios de argila e pedregulho, quando a sedimentação é feita sem defloculante, e o mesmo solo é classificado como uma argila areno siltosa quando esta é feita com defloculante. Cabe aqui ressaltar que a completa classificação de um solo depende também de outros fatores além da granulometria, sendo a adoção de uma

nomenclatura baseada apenas na curva granulométrica insuficiente para uma previsão, ainda que qualitativa, do seu comportamento de engenharia.

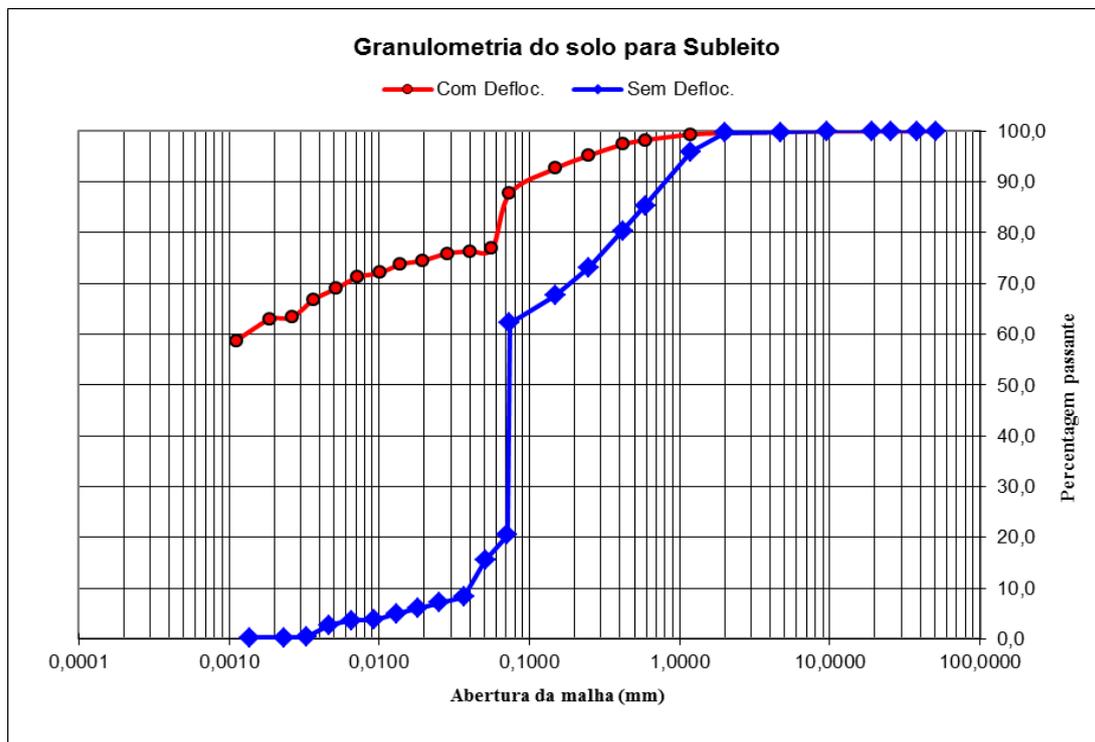


Figura 4.12. Curvas granulométricas do solo para o subleito do modelo físico de verdadeira grandeza

Já para as classificações da HRB (*Highway Research Board*) e SUCS (*Unified Soil Classification System*) o solo, tanto na condição com e sem defloculante, recebe a classificação de A-7-5 e MH, respectivamente. Esta classificação demonstra que o solo corresponde a um solo siltoso ou segundo a HRB um silte arenoso, o que conduziria a um comportamento ruim quando este material é analisado como subleito. Entretanto, este tipo de afirmação é contrastada em se tratando de solos lateríticos como demonstram Beligni & Cincerre (2000), na publicação, os autores apresentam peculiaridades dos solos tropicais onde, por exemplo, os solos que se classificam no grupo A-7-5, quando adequadamente compactados, podem se comportar como um ótimo subleito, caso laterítico, ou um péssimo subleito, caso saprolítico (baixa capacidade de suporte, muito resiliente e elevada expansão). Ainda, segundo os autores este comportamento torna a classificação de solos HRB inapropriada para solos tropicais.

Devido esta peculiaridade dos solos lateríticos Nogami & Villibor (1980), propuseram uma classificação para solos tropicais denominada MCT que distingue solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não laterítico (saprolítico). A partir da

classificação MCT, Muñetón (2013) caracterizou o perfil típico de solo do campo experimental do PPG-UnB, conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Classificação MCT de um perfil de solo do campo experimental do PPG-UnB (modificado de MUÑETÓN, 2013)

Camada	Profundidade (m)	Classificação MCT
1	1,0	LA' – LG'
2	2,0	LA' – LG'
3	3,0	LG'
4	4,0	LG'
5	5,0	LG'
6	6,0	LG'

A classificação obtida por Muñetón (2013) demonstra que o solo onde se localiza o campo experimental possui comportamento laterítico o que contribui para o melhor entendimento das características mecânicas dos solos utilizados no subleito do modelo físico. Justifica-se o uso da classificação descrito por Muñetón (2013) devido o solo atual desta pesquisa pertencer ao mesmo perfil típico caracterizado pela autora.

De maneira condensada a caracterização básica do material é colocada na Tabela 4.7 onde estão descritas: as percentagens das frações areia, silte e argila; o valor de massa específica; limites de consistência; os valores massa específica seca máxima e umidade ótima encontrados no ensaio de compactação para a energia Proctor normal e intermediária.

Tabela 4.7. Caracterização básica do material destinado para a construção do subleito

<i>Índices físicos</i>	<i>Sedimentação com defloculante</i>	<i>Sedimentação sem defloculante</i>
Densidade dos grãos (g/cm ³)	2,64	
Pedregulho (%)	0,4	0,4
Areia (%)	20,6	81,9
Silte (%)	15,3	17,5
Argila (%)	63,7	0,2
W _L (%)	65,4	
W _P (%)	41	
IP (%)	24,4	
Energia de Compactação	Normal	Intermediária
γ _{dmáx.} (kN/m ³)	14,3	15,0
ω _{ótima} (%)	29,0	26,5
Expansão (%)	Nula	Nula

Para efeito de avaliação da estrutura do pavimento do modelo físico, justifica-se a adoção da energia intermediária por considerar a espessura referente à camada de subleito

como sendo os últimos 60 cm finais de um aterro, que por norma deve ser construído com uma energia de compactação Proctor intermediária. No entanto, de forma a submeter a camada de base (que será o diferencial na pesquisa) a condições mais severas, optou-se por utilizar os parâmetros de compactação da energia normal para confecção da camada de subleito. Sendo assim, foram efetuados ensaios de compactação obedecendo aos critérios normativos da ANBT NBR 7182 para elaboração dos corpos de prova conforme Figura 4.13.



Figura 4.13. Procedimento de compactação do solo de do subleito

Com a realização dos ensaios de compactação foi possível a definição da curva de compactação e posteriormente a definição da umidade ótima e massa específica máxima do material. A Figura 4.14 traz a configuração da curva de compactação do solo tanto para a energia normal quanto para a energia intermediária.

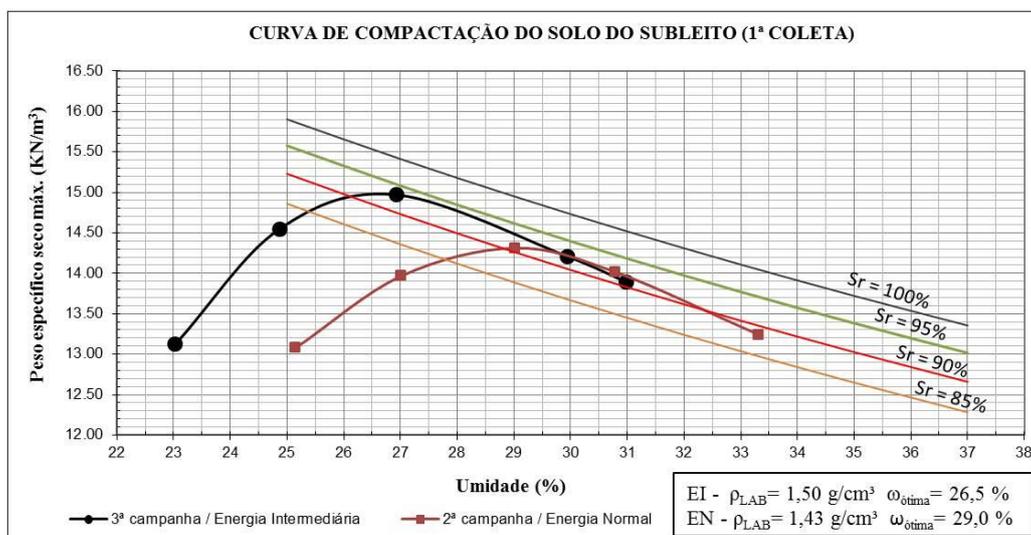


Figura 4.14. Curva de compactação do material destinado a camada de subleito (1ª coleta)

Para efetuar os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi utilizado tanto o laboratório do Centro Universitário de Brasília – (UniCeub) e o laboratório de Infraestrutura (Infralab) da Universidade de Brasília. No UniCeub foram realizados ensaios nas amostras de Proctor normal e no Infralab as amostras foram ensaiadas na energia Proctor intermediário conforme Figura 4.15.



Figura 4.15. Realização dos ensaios de expansão e Índice de Suporte Califórnia no solo do destinado ao Subleito

Por fim, foram realizados ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) para cada um dos pontos definidos no ensaio de compactação, apresentados na Tabela 4.8. Observou-se que o solo para a umidade ótima atende aos critérios mínimos preconizados pelo DNIT que prescreve o ISC das camadas de subleito a valores maiores ou iguais a 2%.

Tabela 4.8. Tabela dos resultados de Índice de Suporte Califórnia do solo de subleito

Energia de compactação	Umidade (%)	$\gamma_{d \text{ máx.}}$ (kN/m ³)	ISC (%)
Normal	29,02	14,31	5,2
Intermediária	26,00	14,87	29,0

Conforme exposto no capítulo de metodologia, para a completa execução da camada de subleito foi necessário uma segunda coleta de solo, não havendo mais disponibilidade do material da primeira coleta optou-se por coletar amostras do horizonte de solo compreendido entre 0 e 3,5 m de profundidade do extinto campo experimental do PPG-UnB, por motivos de praticidade e por se tratar de material bem caracterizado pelas pesquisas do PPG-UnB. Dentre as pesquisas realizadas com o solo compreendido a uma profundidade média de 1,5 m pode-se citar as de: Guimarães (2002), Delgado (2002), Batista (2007) e Muñetón (2013). Essas pesquisas serviram para caracterizar o presente material e avaliar o comportamento do mesmo quando compactado na energia normal. Para tanto foi construída a Tabela 4.9 a seguir na qual

se apresentam características básicas do material e a curva de compactação do material (Figura 4.16).

Tabela 4.9. Caracterização do solo obtido até uma profundidade mínima de 1,0m

Autor	γ_s (kN/m ³)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	$\gamma_{d \text{ máx}}$ (kN/m ³)	$\omega_{\text{ótima}}$ (%)
Delgado (2002)	26,86	-	-	-	15,4	25,0
Guimarães (2002)	26,86	38	28	10	-	-
Batista (2007) ⁽¹⁾	27,83	41	30	11	15,2	23,7
Muñetón (2013)	26,90	36	23	13	17,0	19,0
Análise estatística						
<i>Média</i>	27,11	38,27	27,00	11,30	15,87	22,57
<i>desvpad</i>	0,48	2,41	3,61	1,54	0,99	3,16
<i>n</i>	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
<i>Graus de liberdade</i>	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
<i>Nível de Significância</i>	95%	95%	95%	95%	95%	95%
<i>t (Student)</i>	2,353	2,920	2,920	2,920	2,920	2,920
<i>mínimo</i>	26,55	34,20	20,92	8,70	14,20	17,25
<i>máximo</i>	27,68	42,33	33,08	13,90	17,53	27,89

⁽¹⁾ Corresponde a valores médios a partir de oito determinações executadas pela autora.

Os limites superior e inferior dos conjuntos de pontos amostrais obtidos para os dados de caracterização do solo até a uma profundidade mínima de 1,0 m, para todas as pesquisas citadas na Tabela 4.9, demonstram que os dados de caracterização pertencem ao mesmo espaço amostral.

Segundo a AASTHO, este solo mais superficial (0,5 a 3,0 m de profundidade) possui características boas a excelentes como material de subleito, por se tratar de um material do grupo A-2-6 onde estão incluídas as areias siltosas ou argilosas, esta classificação se confirma com as pesquisas de Guimarães (2002) e Muñetón (2013) quando ambos tratam este material mais superficial como sendo um solo areno siltoso.

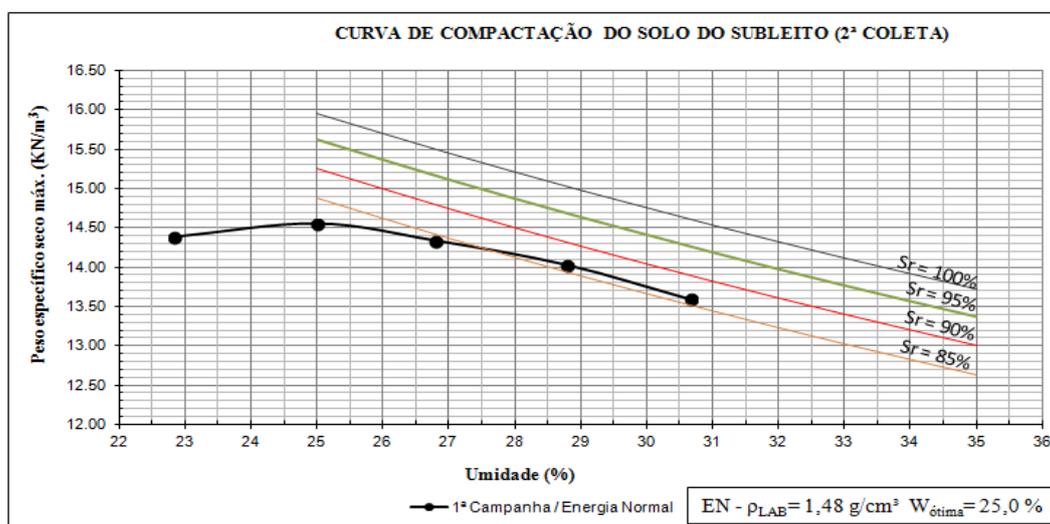


Figura 4.16. Curva de compactação do material destinado a camada de subleito (2ª coleta)

4.3 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A partir dos dois modelos matemáticos foi possível analisar e representar a variação do módulo de resiliência em função do estado de tensão, como mostra a Figura 4.17 e a Figura 4.18. A determinação do coeficiente R^2 de cada modelo possibilitou a comparação entre eles e os dados experimentais para validar qual modelo apresentaria aproximações suficientemente boas para representar o comportamento dos materiais.

Com valores definidos em amostras compactadas na energia intermediária e modificada durante a pesquisa de Gómez (2011) foi possível verificar o bom comportamento do resíduo de construção e demolição reciclado. Na pesquisa a autora comenta que valores de módulo de resiliência na literatura variam entre 150 MPa e 500 MPa para amostras de RCD, sendo que para o resíduo utilizado na pesquisa o MR varia entre 90 e 310 MPa, quando a energia de compactação utilizada foi a Proctor Intermediária, e entre 90 e 240 MPa, quando empregada a energia Proctor Modificada, em média o RCD apresenta valor igual a 140 MPa.

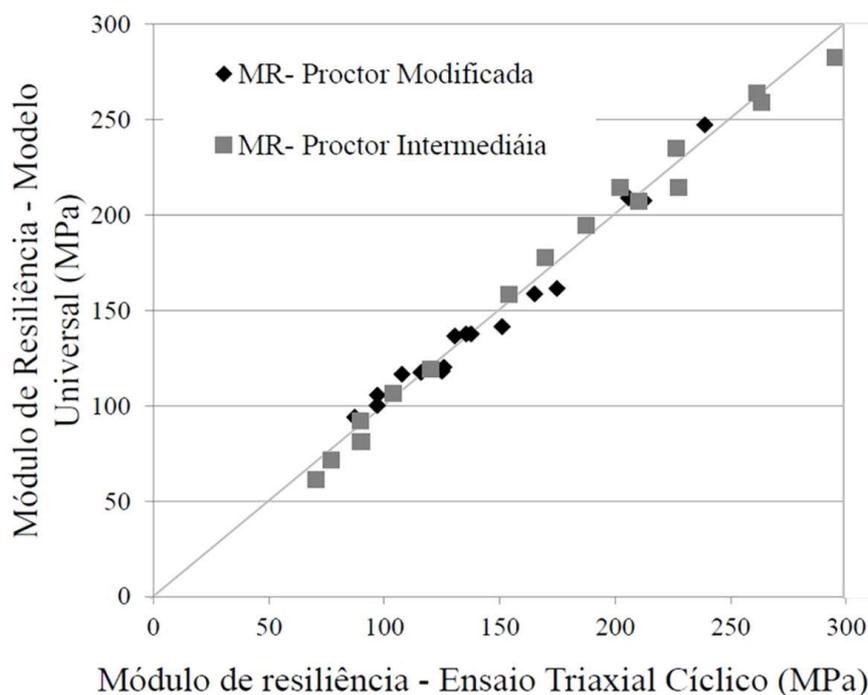


Figura 4.17. Resultados de módulo de resiliência do agregado reciclado de RCD com diferentes energias de compactação (modificada de GÓMEZ, 2011)

De maneira complementar foram realizados ensaios de módulo de resiliência no solo selecionado para elaboração da camada de subleito do modelo físico, como mostra a Figura 4.18. A amostra avaliada corresponde ao solo proveniente da 1ª coleta que apresentou valores de módulo da ordem de 53 MPa em média.

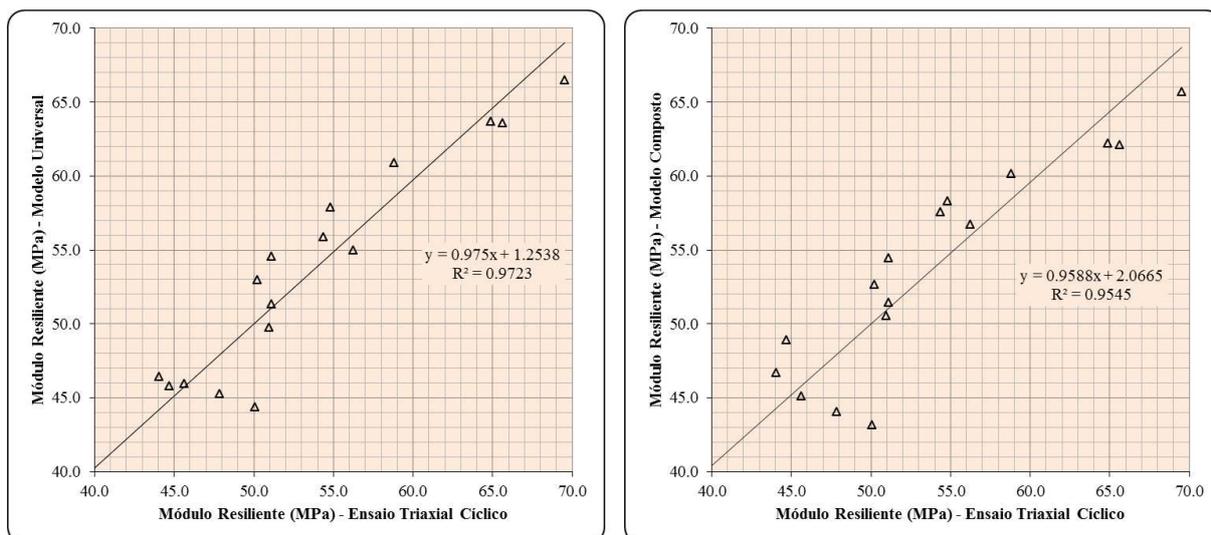


Figura 4.18. Variação do módulo de resiliente vs. o Modelo Universal e o Modelo Composto para o solo de subleito

Por fim, são colocados na Tabela 4.10 abaixo os valores dos coeficientes de regressão (k_1 , k_2 e k_3) determinados a partir dos dados experimentais para o modelo constitutivo universal e o modelo composto.

Tabela 4.10. Modelos de módulo de resiliência obtidos para os materiais de subleito e base

Material de subleito (solo referente a 1ª coleta)			Material de base (RCD)		
Modelo Universal / Energia Proctor Normal			Modelo Universal / Energia Proctor Modificada		
k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
615.19	0.50	-1.56	804.82	-0.04	1.49
Modelo Composto/ Energia Proctor Normal			Modelo Composto / Energia Proctor Modificada		
k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
135.81	0.34	-0.08	396.70	-0.08	0.53

4.4 MODELO FÍSICO DE VERDADEIRA GRANDEZA

Neste item são apresentados e analisados os ensaios de controle de execução do modelo físico, os resultados obtidos da instrumentação e os resultados da retroanálise do modelo físico.

4.4.1 ANÁLISES DE CONTROLE TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS

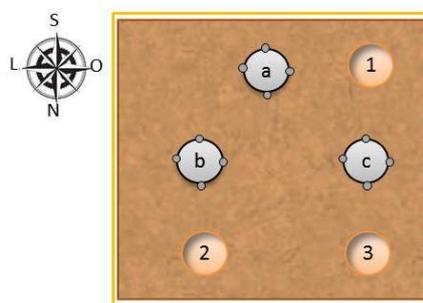
De maneira a avaliar a metodologia de construção proposta e, assim, perceber as dificuldades da construção como também o desempenho dos materiais que compõem as

camadas do pavimento do modelo físico, foram extraídos os primeiros resultados provenientes dos controles de compactação efetuados na caixa experimental de madeira. Assim, os controles executados no material de subleito (solo referente à 1ª coleta) e base estão expostos nas Tabela 4.11 e Tabela 4.12, respectivamente.

Tabela 4.11. Resultados dos controles de compactação do solo destinado para o subleito (1ª coleta)

Densímetro elétrico - EDG			$\rho_{LAB} (g/cm^3) = 1.43$		$\omega_{ótima} = 29\%$
Localização	$\rho (g/cm^3)$	$\rho_d (g/cm^3)$	$\omega (%)$	$\Delta\omega_{ótima} (%)$	G.C. (%)
a	1,740	1,341	29,8	+ 0,8	93,8
b	1,755	1,352	29,9	+ 0,9	94,5
c	1,725	1,327	30,0	+ 1,0	92,8
Média	1,740	1,340	29,9	+ 0,9	93,7
Frasco de Areia			$\rho_{LAB} (g/cm^3) = 1.43$		$\omega_{ótima} = 29\%$
Localização	$\rho (g/cm^3)$	$\rho_d (g/cm^3)$	$\omega (%)$	$\Delta\omega_{ótima} (%)$	G.C. (%)
1	1,633	1,263	29,2	+ 0,2	88,3
2	1,691	1,301	30,0	+ 1,0	91,0
3	1,756	1,348	30,3	+ 1,3	94,3
Média	1,693	1,304	29,8	+ 0,8	91,2

Representação da localização das leituras na caixa experimental



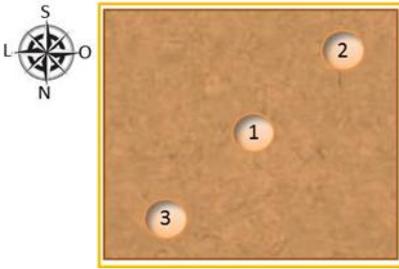
Ao realizar uma análise estatística por meio da distribuição *t* de *Student*, dos dados da Tabela 4.11, é possível estabelecer os limites superior e inferior dos conjuntos de pontos amostrais obtidos para os valores de massa específica seca ($1,290 \text{ g/cm}^3$ à $1,350 \text{ g/cm}^3$) e umidade ($29,6 \%$ à $30,2 \%$). Com exceção do resultado (1) obtido pelo frasco de areia que apresenta valores abaixo dos limites mínimos, para as duas propriedades, comprovou-se que as duas metodologias (densímetro elétrico e frasco de areia) possuem uma boa correlação entre seus dados, visto que o desempenho do densímetro elétrico (*EDG - Electrical Density Gauge*) foi satisfatório. No entanto, é importante ressaltar que o desempenho do EDG está vinculado com “homogeneidade” das propriedades do solo com o qual foi calibrado.

Observa-se baixos valores de grau de compactação para o material de subleito, esse comportamento provavelmente advém da dificuldade de se obter uma compactação eficiente por meio do compactador manual (sapo mecânico) principalmente quando se trata de solos finos como o do subleito.

Tabela 4.12. Resultados dos controles de compactação do resíduo destinado para a base

Frasco de Areia			$\rho_{LAB}(g/cm^3)=$ 1.80		$\omega_{ótima}=$ 13%
Localização	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ω (%)	$\Delta\omega_{ótima}$ (%)	G.C. (%)
1	2.214	1.991	11.2	-1,8	110.6
2	2.200	1.961	12.2	-0,8	109.0
3	2.150	1.938	10.9	-2,1	107.7
Média	2.188	1.963	11.4	-1,6	109.1

Representação da localização das leituras na caixa experimental



O diagrama mostra um compasso com as direções S (Sul), N (Norte), L (Leste) e O (Oeste). À direita do compasso, há uma representação de uma caixa experimental com um fundo marrom. Três pontos de amostragem são indicados por círculos numerados: o ponto 1 está no centro, o ponto 2 está no canto superior direito e o ponto 3 está no canto inferior esquerdo.

Para o controle do material de base (RCD-R) não foram executadas calibrações do densímetro elétrico (EDG) devido a possibilidade de dano do equipamento com o empenamento das estacas metálicas e com isso o comprometimento das leituras do equipamento.

Os resultados de controle demonstram uma boa eficiência da metodologia de compactação apesar das dificuldades de manobra do compactador manual dentro da caixa experimental. O grau de compactação apresentou resultados superiores a 100% evidenciando um emprego de uma energia de compactação apropriada.

Com a construção dessas camadas experimentais aproveitou-se para avaliar o Índice de Suporte Califórnia (ISC) em amostras confeccionadas a partir de blocos indeformados. Os resultados são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Valores de ISC do material de subleito compactado na caixa experimental

Amostras	Umidade (%)	γ_d (kN/m ³)	ISC (%)
1	28,36	13,44	4,7
2	29,91	12,80	3,1

Ao comparar os resultados de ISC para amostras compactadas na caixa *versus* os de laboratório verifica-se que os valores de campo foram menores que os determinados em laboratório (Tabela 4.8). A partir da distribuição *t* de Student definiram-se os limites inferior e superior dos valores de ISC, os limites demonstram que os valores das amostras compactadas em laboratório (na energia normal) e em campo pertencem ao mesmo espaço amostral quando comparados, como exposto na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Análise estatística dos ISC para amostras de laboratório e campo

<i>Parâmetros</i>	ISC (%)
<i>Média</i>	4,3
<i>Desvio padrão</i>	1,097
<i>N</i>	3
<i>Graus de liberdade</i>	2
<i>Nível de Significância</i>	95%
<i>t (Student)</i>	2,920
<i>Mínimo</i>	2,48
<i>Máximo</i>	6,18

Para a camada experimental de base não foram realizadas análises de ISC com retirada de amostras indeformadas devido à dificuldade da obtenção deste tipo de amostra no Resíduo de Construção e Demolição (RCD), que apresentam baixa coesão.

Com relação ao controle da construção do modelo físico de verdadeira grandeza, foram obtidos os resultados descritos na Tabela 4.15 a seguir, da seguinte forma: para as duas primeiras camadas do subleito construídas com o solo da 1^o coleta (ver item 3.1.4), o equipamento de controle foi o densímetro elétrico (EDG); para as duas últimas camadas do subleito e camada de base o equipamento de controle foi o frasco de areia (FA).

Tabela 4.15. Controle de compactação das camadas do modelo físico

Camada	Espessura (cm)	ρ (g/cm³)	ρ_d (g/cm³)	ω (%)	G.C. (%)
Base	20,0	1,906	1,690 (FA)	12,8 $\Delta\omega_{ótima} = -0,2 \%$	93,9
▲ (Solo 2 ^a coleta)	4 ^a camada	13,5	1,797 (FA)	22,0 $\Delta\omega_{ótima} = -3 \%$	99,5
	3 ^a camada				
 Subleito	2 ^a camada	15,5	1,489 (FA)	20,3 $\Delta\omega_{ótima} = -5 \%$	83,7
	1 ^a camada				
 (Solo 1 ^a coleta)	2 ^a camada	15,3	1,710 (EDG)	30,5 $\Delta\omega_{ótima} = +1,5 \%$	91,6
	1 ^a camada				
▼	1 ^a camada	17,2	1,666 (EDG)	31,0 $\Delta\omega_{ótima} = +2 \%$	88,9
Dados de laboratório		Resíduo → ρ_{LAB} (g/cm ³)= 1,80 $\omega_{ótima}$ = 13 % Solo 1 ^o coleta → ρ_{LAB} (g/cm ³)= 1,43 $\omega_{ótima}$ = 29 % Solo 2 ^o coleta → ρ_{LAB} (g/cm ³)= 1,48 $\omega_{ótima}$ = 25 %			

Do controle das camadas do modelo físico apresentado na Tabela 4.15, observa-se que o grau de compactação das camadas foi baixo e credita-se este comportamento pela dificuldade de utilização do computador manual (sapo) em espaço restrito. Nota-se ainda a

dificuldade em controlar o teor de umidade, devido à heterogeneidade e alta absorção do material.

De maneira a caracterizar as propriedades reais da estrutura do modelo, o revestimento de concreto asfáltico foi submetido a um plano de amostragem (por meio de sonda rotativa), após a realização dos ensaios, que teve como principal objetivo o mapeamento da espessura do revestimento e suas propriedades de resistência e rigidez. Com a extração de corpos de prova como ilustrado na Figura 4.19 se realizou ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência que são fundamentais na definição de parâmetros para as retroanálises. Também foram obtidos resultados de caracterização básica da massa asfáltica que colaboraram para melhor entendimento do comportamento da estrutura.

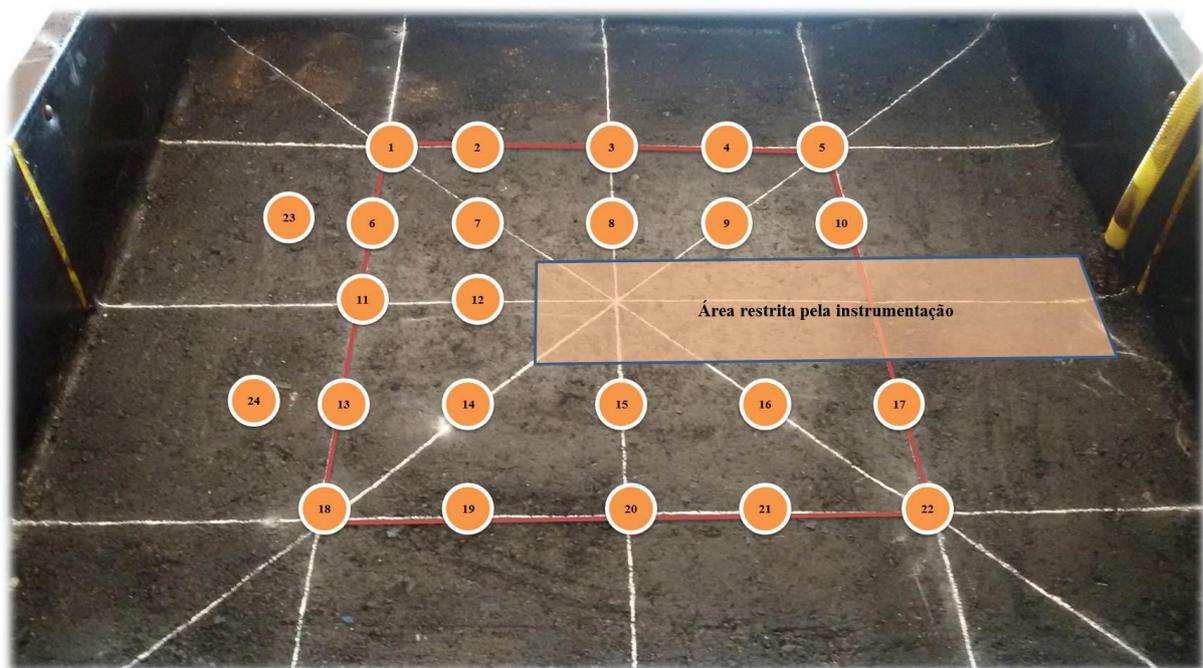


Figura 4.19. Plano de amostragem do revestimento

O valor médio da espessura do revestimento foi de 5,3 cm e a espessura próxima ao ponto de aplicação da carga variou entre 5,3 e 5,5 cm, conforme a Figura 4.20. Com esta constatação foi possível estabelecer uma espessura mais próxima à realidade em vez de adotar uma espessura de 5,0 cm exatos, como era o horizonte inicial das retroanálises.

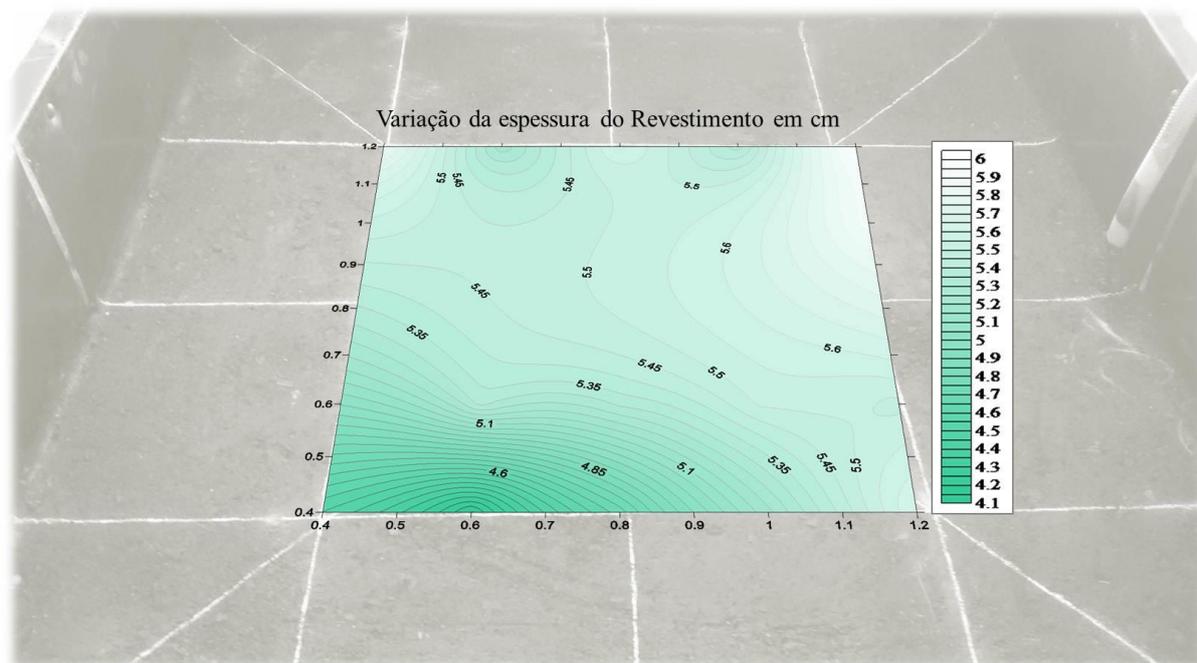


Figura 4.20. Variação da espessura do revestimento em centímetros

Resumidamente as características físicas e mecânicas do concreto asfáltico das amostras extraídas são dispostas na Tabela 4.16 a seguir.

Tabela 4.16. Características volumétricas e mecânicas do concreto asfáltico

Corpo-de-prova 5% de CAP 50/70	Nº	1	2	3	4	5	10	14	15	16	17	19	20	21	22	Média	desvpad
Peso seco ao ar	g	946.5	917.7	989.4	951.4	1018.3	1050.7	932.5	952.4	990.1	957.9	700.8	796.2	917.9	967.9	935.0	89.2
Peso imerso	g	541.2	539.1	578.4	559.4	590.7	618.1	549	557.1	582.2	552.2	399.6	459.4	536.2	556.9	544.3	54.8
Densidade Aparente	g/cm³	2.34	2.42	2.41	2.43	2.38	2.43	2.43	2.41	2.43	2.36	2.33	2.36	2.40	2.35	2.39	0.0
Diâmetro Médio	cm	9.81	9.76	9.84	9.81	9.83	9.87	9.75	9.82	9.84	9.87	9.86	9.85	9.82	9.92	9.83	0.0
Espessura	cm	5.83	5.22	5.61	5.33	6.00	5.92	5.32	5.31	5.51	5.48	4.14	4.67	5.18	5.66	5.37	0.5
Densidade Máx. medida - DMM	g/cm³	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	2.512	0.0
Volume de Vazios	%	7.0	3.5	4.2	3.4	5.2	3.3	3.2	4.1	3.4	6.0	7.4	5.9	4.3	6.3	4.8	1.5
Densidade do CAP 50/70	g/cm³	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	0.0
Vazios com Betume - VCB	%	10.9	11.3	11.2	11.3	11.1	11.3	11.4	11.3	11.3	11.0	10.9	11.0	11.2	11.0	11.2	0.2
Vazios de Agregado mineral - VAM	%	18	15	15	15	16	15	15	15	15	17	18	17	16	17	16	1.3
Relação Betume / Vazios - RBV	%	61	76	73	77	68	77	78	73	77	65	60	65	72	64	70	6.6
Módulo de Resiliência - MR	MPa	-	1847	-	-	-	-	-	1458	1882	-	-	-	-	-	1729	235
Resistência a Tração - RT	MPa	-	-	0.81	-	-	-	0.81	-	-	-	-	-	0.82	-	0.81	0.0

Com relação aos resultados mecânicos de resistência a tração e de módulo de resiliência, optou-se para a realização dos ensaios nos corpos de prova com as faces mais simétricas (CP3, CP14 e CP21). Com base na norma DNIT 031/2006 – ES os resultados de resistência a tração do material (CBUQ faixa C) atendem com folga o valor limite estipulado por norma de 0,65 MPa e apresenta magnitude próxima a valores determinados em pesquisas com materiais similares, a exemplo o resultado encontrado por Souza *et al.* (2012) onde os autores determinam um valor de 0,86 MPa de RT para corpos de prova confeccionados com agregado calcário do Distrito Federal.

Para a escolha dos CPs para a determinação do módulo de resiliência do concreto asfáltico foi empregado o mesmo critério, descrito acima, para a seleção dos CP2, CP15 e CP16. Dos resultados o CP15 foi o que apresentou menor valor e maior discrepância em relação CP2 e CP16, possivelmente pelo maior valor de volume de vazios.

Por fim, em termos dos critérios preestabelecidos pela DNIT 031/2006 – ES, para este tipo de mistura, pode-se afirmar que as amostras mais próximas ao ponto de aplicação de carga (CP10, CP14, CP15, CP16) possuem características volumétricas condizentes a uma mistura asfáltica do tipo CBUQ, ou seja, Vv entre 3 a 5%; RBV entre 75 a 82%; VAM mínimo de 15%.

4.4.2 ANÁLISES DO ENSAIO DE CARREGAMENTO CÍCLICO

Como descrito no capítulo de metodologia, o experimento consistiu em simular um carregamento cíclico, de um semi-eixo padrão, sobre uma estrutura de pavimento instrumentada de maneira a acompanhar o desempenho de um pavimento construído com uma camada de base de RCD-R. Os resultados a seguir são os dados de resposta da instrumentação, previamente tratados, dispostos geralmente em termos de número de ciclos *versus* valor observado.

4.4.2.1 ANÁLISES DE DESLOCAMENTO SUPERFICIAIS

Para um melhor entendimento faz-se necessária uma melhor explicação da metodologia utilizada nas análises dos dados da instrumentação. Ao executar um ensaio cíclico, fica claro que se têm valores máximos e mínimos para determinada grandeza de engenharia (deslocamento, carga, tensão total etc.). Dessa forma, ao se observar o esquema apresentado na Figura 4.21, no qual é mostrado de maneira esquemática o desenvolvimento dos deslocamentos *versus* número de ciclos, observa-se que o acúmulo do deslocamento plástico corresponde aos valores mínimos da curva e a diferença entre os valores máximos e mínimos para um mesmo estágio de aplicação corresponde aos deslocamentos elásticos ou resilientes (δ_r).

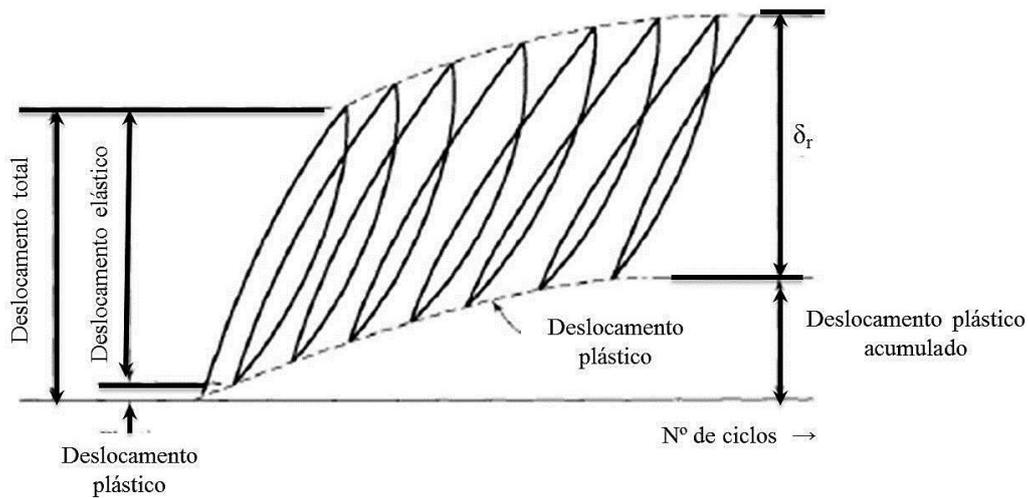


Figura 4.21. Representação do comportamento do deslocamento em um ensaio cíclico

Assim, com a aplicação do carregamento dinâmico, ocorrem deslocamentos que são registrados, por exemplo, pelo Transdutor Linear de Posição Resistivo (TLPR) instalado na superfície do pavimento. Seguindo essa linha de pensamento, os dados da instrumentação foram organizados em termos de valores máximos e mínimos, conforme Figura 4.22, para posterior tratamento.

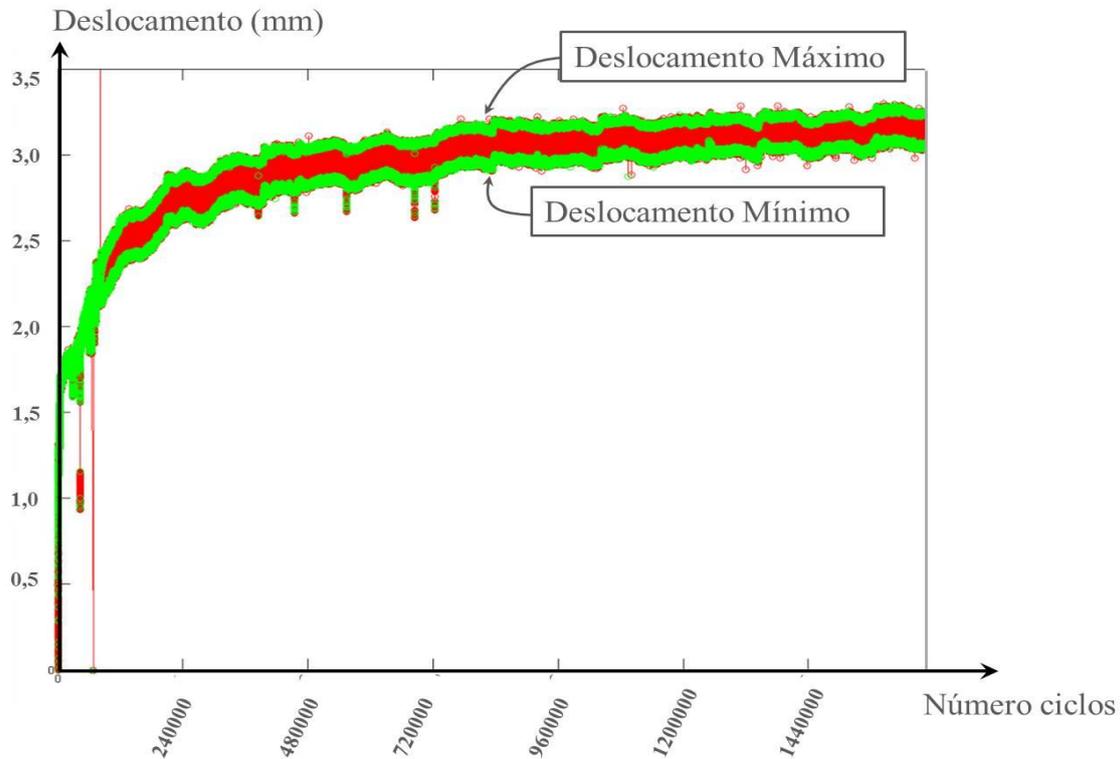


Figura 4.22. Comportamento dos deslocamentos acumulados do Transdutor linear de posição resistivo (TLPR 2) posicionado no ponto de aplicação da carga

Na Figura 4.22, observa-se que até 100 mil ciclos o deslocamento plástico no ponto de aplicação da carga cresce rapidamente e a partir desse valor começa sofrer acréscimos mais suaves, o que denota um aumento no nível de acomodação das partículas. Quebras repentinas no comportamento da leitura do TLPR 2 também são observadas e são justificadas por pausas ocasionais ocorridas durante o experimento. Vale ressaltar que tal comportamento é nítido nas leituras de outros instrumentos.

Os valores mínimos registrados pelos os cinco TLPR correspondem aos valores de deslocamento de interesse, quando se analisa do ponto de vista de deslocamentos permanentes ou plásticos. A Figura 4.23 demonstra o acúmulo de deslocamentos plásticos registrados na superfície do revestimento em pontos localizados: a 0 m, 0,25 m, 0,5 m e 1,0 m em relação ao ponto de aplicação da carga.

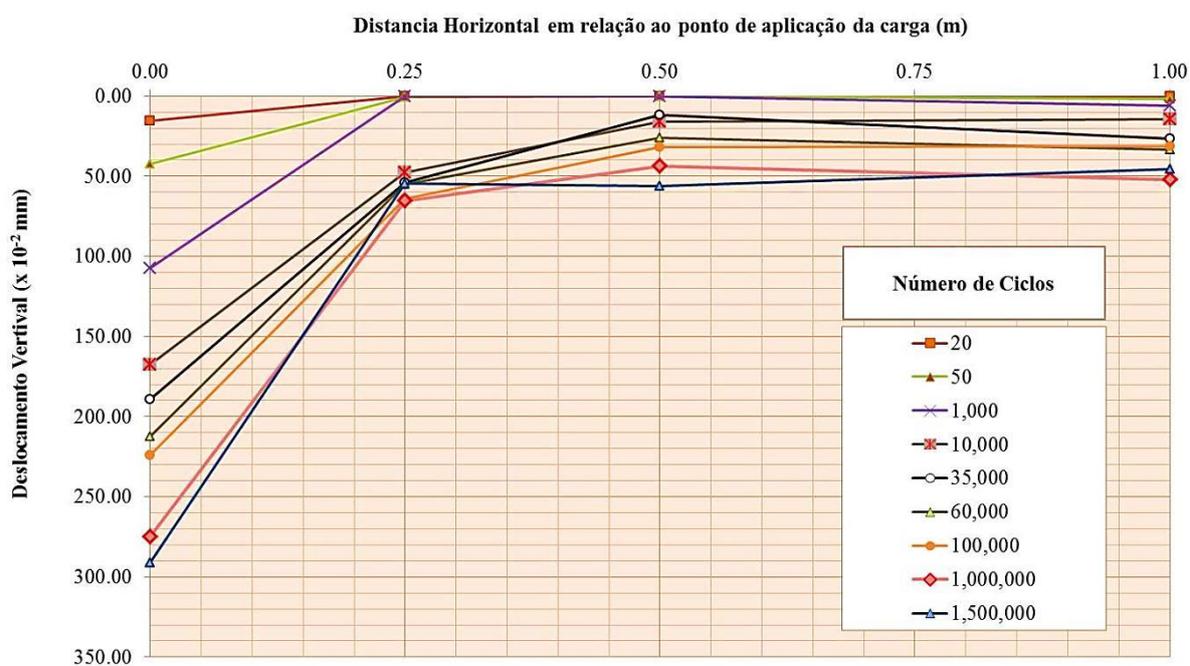


Figura 4.23. Desenvolvimento dos deslocamentos verticais mínimos em relação ao número de ciclos de aplicação de carga

Os resultados da bacia de deslocamentos plásticos em função do número de ciclos de carga (Figura 4.23) demonstram que para pontos distantes até 50 cm do ponto de aplicação da carga sofrem uma maior influência do carregamento apresentando maiores valores de deslocamento. Para valores entre mil e 10 mil ciclos, os deslocamentos plásticos tendem a aumentar de maneira mais expressiva e para número de ciclos maiores que 10 mil os

deslocamentos crescem de forma amena nos pontos mais afastados do ponto de aplicação da carga.

De modo a avaliar a magnitude dos deslocamentos até um número de repetições de carga equivalente a um número $N = 1,0 \times 10^6$, ou seja, correspondente a uma via submetida a tráfego leve, foi preciso definir limites admissíveis diante de duas perspectivas: do ponto de vista do revestimento e da estrutura do pavimento.

Os deslocamentos permanentes do pavimento podem ser avaliados por meio do afundamento de trilha de roda com o auxílio de uma treliça para medir afundamentos. Com base na literatura (MEDINA & MOTTA, 2005), os deslocamentos superficiais estão ligados diretamente com as deformações permanentes e podem ser limitados com valores de afundamento de trilha de roda da ordem de 10 mm (para autoestradas) e 16 mm (estradas de menor volume de tráfego).

O valor de deslocamento plástico acumulado no ensaio até 1×10^6 ciclos foi de 2,75 mm e, portanto, o modelo não atinge o limite crítico de afundamento (do pavimento).

Os deslocamentos plásticos ou permanentes, das misturas asfálticas, podem ser limitados a partir de ensaios de laboratório que simulam as solicitações do tráfego, em condições de temperatura controlada. Segundo Quiñones (2014), um dos ensaios que simula essas solicitações e temperatura é o equipamento francês desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) com base na Norma AFNOR NF P 98-250-2 (1991). As diretrizes francesas para as deformações permanentes limitam o valor obtido no simulador de tráfego em 10 %, em placas entre 6 e 8 cm. Contudo, Moura (2010) sugere a adoção do limite máximo de 5 % de deformação permanente em trilha de roda, obtida com o equipamento francês tipo LCPC, em placas de 5 cm de espessura, para as misturas asfálticas brasileiras que serão submetidas ao tráfego considerado pesado, com baixas velocidades e temperaturas de serviço médias elevadas. Portanto, o afundamento plástico máximo segundo este critério seria de 2,5 mm (5% de 5 cm) após 30 mil ciclos de carga, ou 60 mil passadas do eixo.

Ressalta-se, porém, que o simulador LCPC ensaia a camada de revestimento asfáltico diretamente sobre uma base metálica rígida, ou seja, considera o afundamento apenas desta camada. O valor acumulado no ensaio, para 60 mil ciclos foi de **2,13 mm** e inclui as deformações de camadas inferiores. Portanto, a deformação do CBUQ atende também a esta diretriz.

Dentre as teorias utilizadas para se descrever o comportamento de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos destaca-se a teoria do *Shakedown* que para projetos de pavimentação pode ser utilizada para a definição de um nível de tensão crítico, que permita estabelecer um estado de acumulação de deformação que passa do estável ao instável. O *Shakedown* também pode ser utilizado para encontrar o nível de carga máximo associado com a resposta resiliente do material.

De acordo com Werkmeister *et al.* (2004), a teoria do *Shakedown* classifica a deformação permanente dos materiais granulares, submetidos a carregamentos cíclicos, em três faixas de comportamento:

- I. A amplitude do carregamento aplicada faz que a taxa de deformação decresça até um valor quase nulo, podendo se afirmar que a resposta nesta faixa é elástica.
- II. A taxa de deformação diminui até um valor muito pequeno e logo após, se apresenta um ciclo de carga, no qual a taxa de deformação se incrementa até levar o material ao colapso.
- III. A amplitude do carregamento é tão elevada, que desde o início da aplicação do carregamento, o material exibe uma taxa de deformação permanente constante, que por fim, o leva ao colapso.

Essas três faixas são conhecidas como “*Shakedown plástico*”, “*Creep plástico*” e “*Colapso incremental*” respectivamente.

Fazendo um paralelo do fenômeno descrito acima e o comportamento ilustrado nas Figura 4.24 e Figura 4.25 para os deslocamentos plásticos, é possível verificar que o modelo físico experimental tende à acomodação quando a derivada da função que expressa o comportamento de acúmulo de deformações permanentes se aproxima de valores nulos. Portanto, para ciclos de carga acima 1×10^5 , os valores da derivada são bem próximos a zero indicando a ocorrência do comportamento de *Shakedown* plástico.

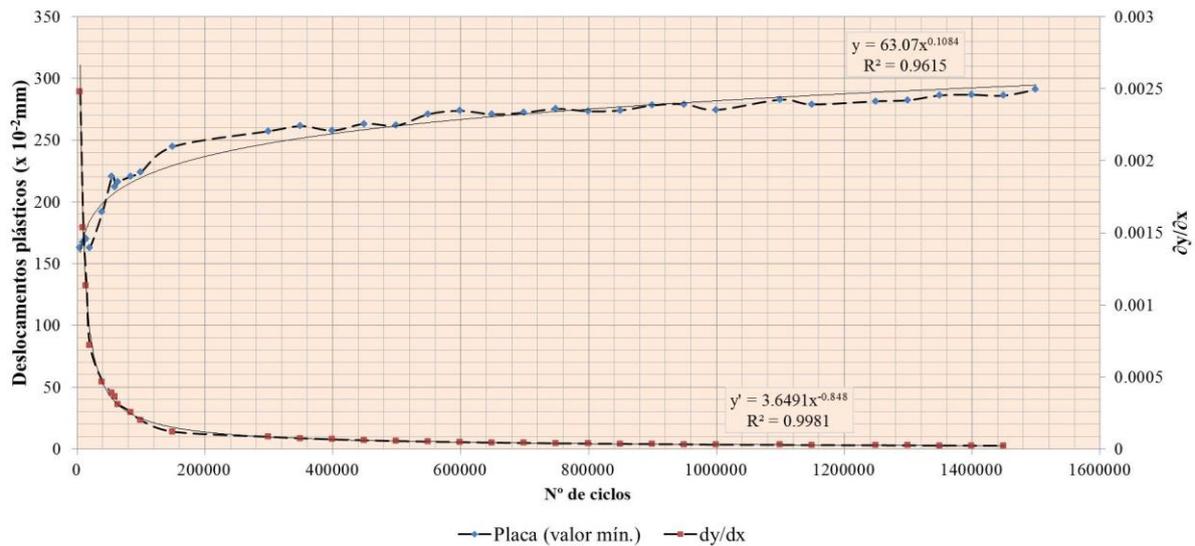


Figura 4.24. Deslocamentos plásticos acumulados no ponto de aplicação da carga *versus* a derivada da função de deslocamentos plásticos

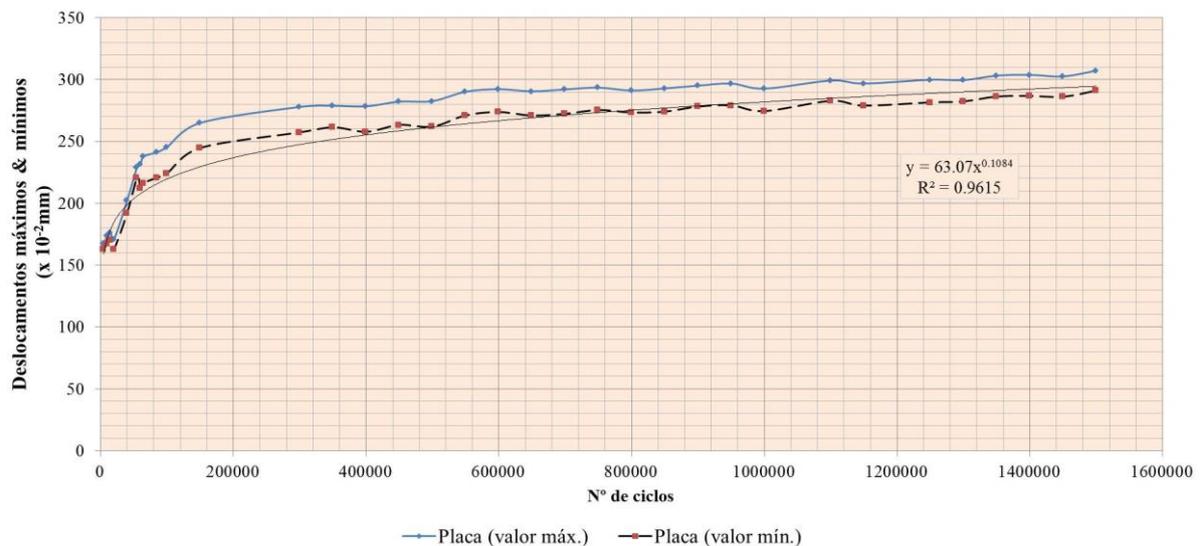


Figura 4.25. Deslocamentos máximos e mínimos (plásticos) acumulados no centro de aplicação de carga

Na Figura 4.25 são mostrados os deslocamentos médios (máximos e mínimos) para os Transdutores Lineares de Posição Resistivos (TLPR 1 e TLPR 2) posicionados (sobre a placa metálica) no ponto mais próximo do centro de aplicação de carga. Da diferença entre os valores máximos e mínimos, é possível estabelecer o valor do deslocamento elástico para ciclos de carga acima de 1×10^5 ficam constantes.

Dessa maneira, extrapolando esta interpretação para os demais TLPR instalados na superfície do revestimento se determina a bacia de deslocamentos elásticos apresentada pelo

modelo físico. Essa bacia elástica é importante para as análises por dois motivos, o primeiro se refere à viabilização dos estudos de retroanálise do modelo físico e o segundo permite que se avalie o desempenho estrutural do modelo segundo a norma DNER-PRO 011/79 do Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (DNIT), os valores obtidos para a bacia de deslocamentos elásticos estão descritos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Valores da bacia de deslocamentos elásticos

Distância horizontal em relação ao ponto de aplicação da carga (cm)	Deslocamentos elásticos	
0	0.181 mm	18.14 x10 ⁻² mm
25	0.110 mm	11.04 x10 ⁻² mm
50	0.058 mm	5.76 x10 ⁻² mm
100	0.032 mm	3.15 x10 ⁻² mm

Na norma DNER-PRO 011/79 são estabelecidos critérios para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis, um dos critérios estabelecidos é que a deflexão no ponto (D_p) seja menor ou igual a deflexão admissível (D_{adm}) e que o raio de curvatura (R) seja maior ou igual a 100 m, para que a estrutura seja avaliada qualitativamente como boa.

Os valores de raio de curvatura e deflexão admissível são obtidos por meio das Eq. (4.1) e Eq. (4.2), respectivamente.

$$R = \frac{10 \cdot x^2}{2(d_0 - d_x)} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

$$\log(D_{adm}) = 3,01 - 0,176 \cdot \log N \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Onde:

R = raio de curvatura em m

x = distância entre o ponto de aplicação de carga e o ponto considerado em cm

d_0 = deflexão no ponto de aplicação de carga em 0,01 mm

d_x = deflexão no ponto considerado em 0,01 mm

D_{adm} = deflexão admissível em 0,01 mm

N = número de solicitações de eixos equivalentes

Com base nas formulações foram obtidos os valores de deflexão admissível igual a $83,8 \times 10^{-2}$ mm (para $N = 1,5 \times 10^6$) e raio de curvatura igual a 440 m (para $x = 25$ cm), os

resultados permitem concluir que a estrutura do modelo físico encontra-se em condições estruturais boas, até o último ciclo de carga do ensaio.

4.4.2.2 ANÁLISES DE TENSÕES VERTICAIS

Para as análises de tensão foram utilizadas quatro células de tensão total no eixo de simetria do ponto de aplicação de carga e em profundidades específicas como ilustrado na Figura 4.26. Esses pontos foram escolhidos por sofrerem maior influência do carregamento, sendo os pontos a 7 cm e a 25 cm de profundidade os pontos de maior interesse para a pesquisa por permitirem uma maior avaliação da camada de base construída com RCD.

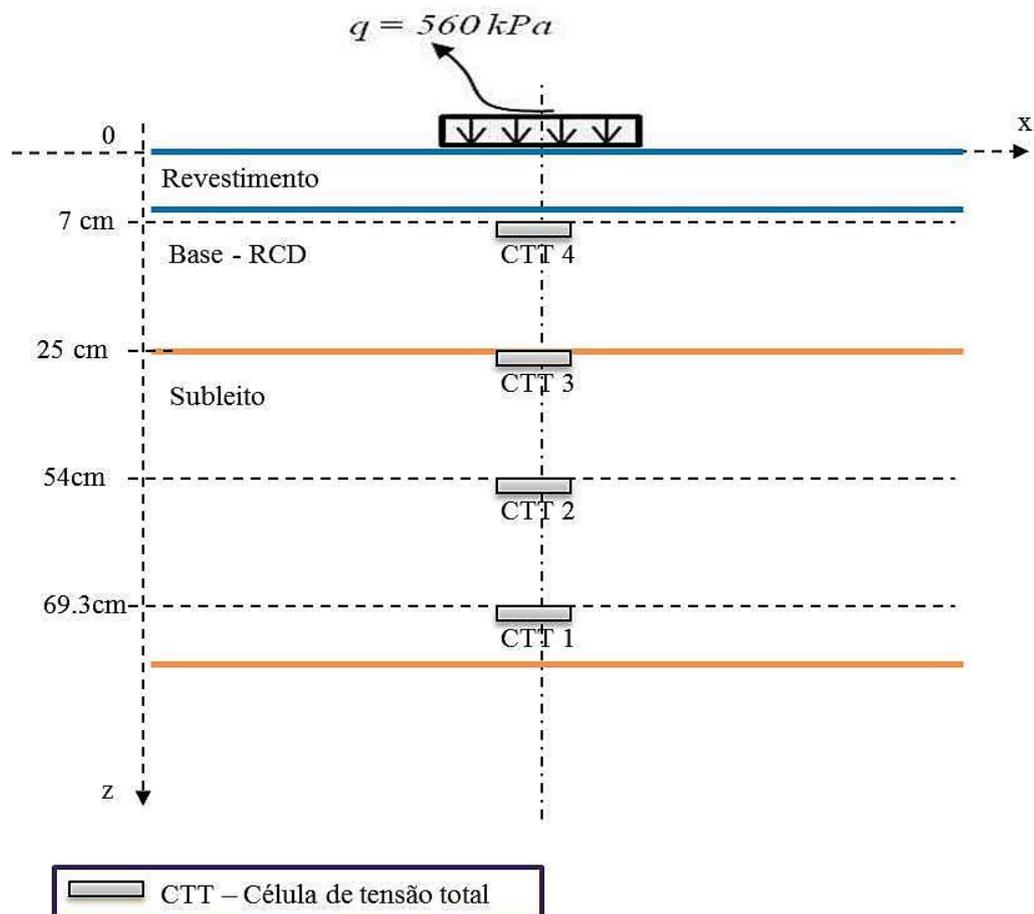


Figura 4.26. Esquema representativo do posicionamento das células de tensão total

Na Figura 4.27 são dispostos os resultados de leitura para cada célula de tensão total em função do número de aplicações de carga. O aumento mais expressivo das tensões totais se estabelece de acordo com a Figura 4.27 até os 100 mil ciclos iniciais, sendo este ponto de partida para acréscimos de tensão de forma menos acentuada.

Os resultados mostram também a tensão aplicada na placa durante o ensaio, onde os valores oscilaram entre 560 a 580 kPa, essa variação pode ser justificada pela limitação do equipamento de ensaio, cujo ajuste de carga é efetuado manualmente e sazonalmente.

Ao assumir como hipótese que a tensão aplicada na superfície do revestimento corresponde aos 560 kPa exatos e que os valores médios lidos na CTT4, CTT3, CTT2 e CTT1 são 240 kPa, 100 kPa, 60 kPa e 55 kPa, respectivamente, observa-se uma redução gradativa da carga aplicada no revestimento da ordem de 57 % para fibra inferior do revestimento, de 82 % para camada inferior da base e de 90 % para as camadas mais ao centro do subleito.

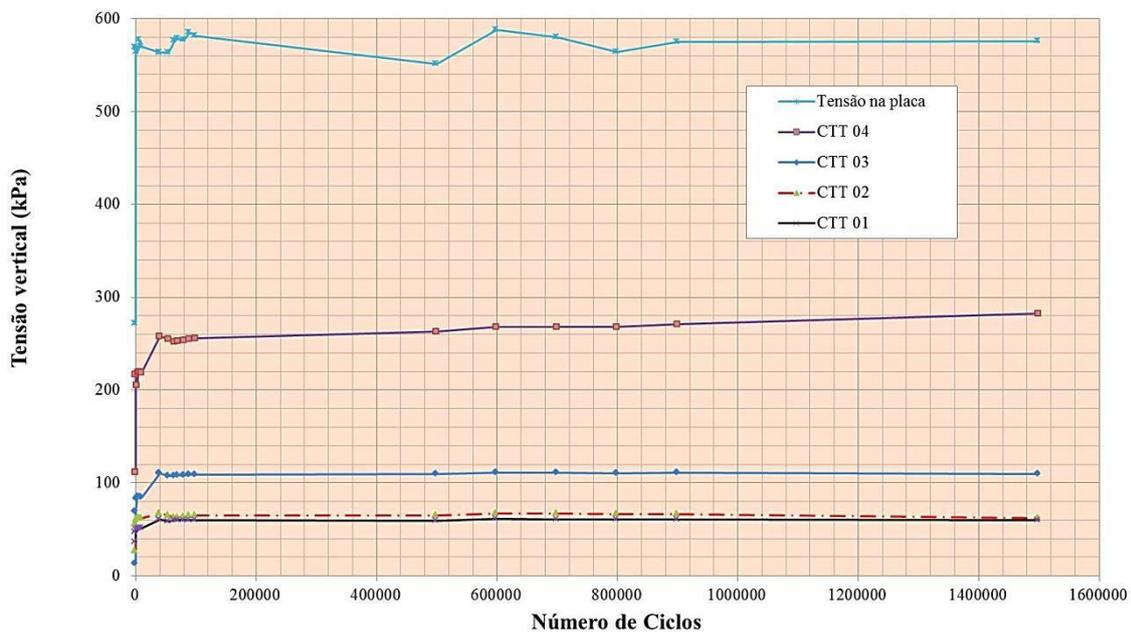


Figura 4.27. Desenvolvimento das tensões totais máximas aplicadas durante o ensaio

De fato os comentários acima colaboram para uma estimativa da eficiência da camada de base, no entanto, esse comportamento oscila durante todo o ensaio. A Figura 4.28 vem como ferramenta de auxílio para um melhor entendimento do desenvolvimento das tensões, principalmente para o trecho acima de 40 mil ciclos onde o material da estrutura muda de comportamento, acima desse valor de ciclos há uma queda significativa dos percentuais de redução da tensão aplicada entre a camada de revestimento / base e base / subleito.

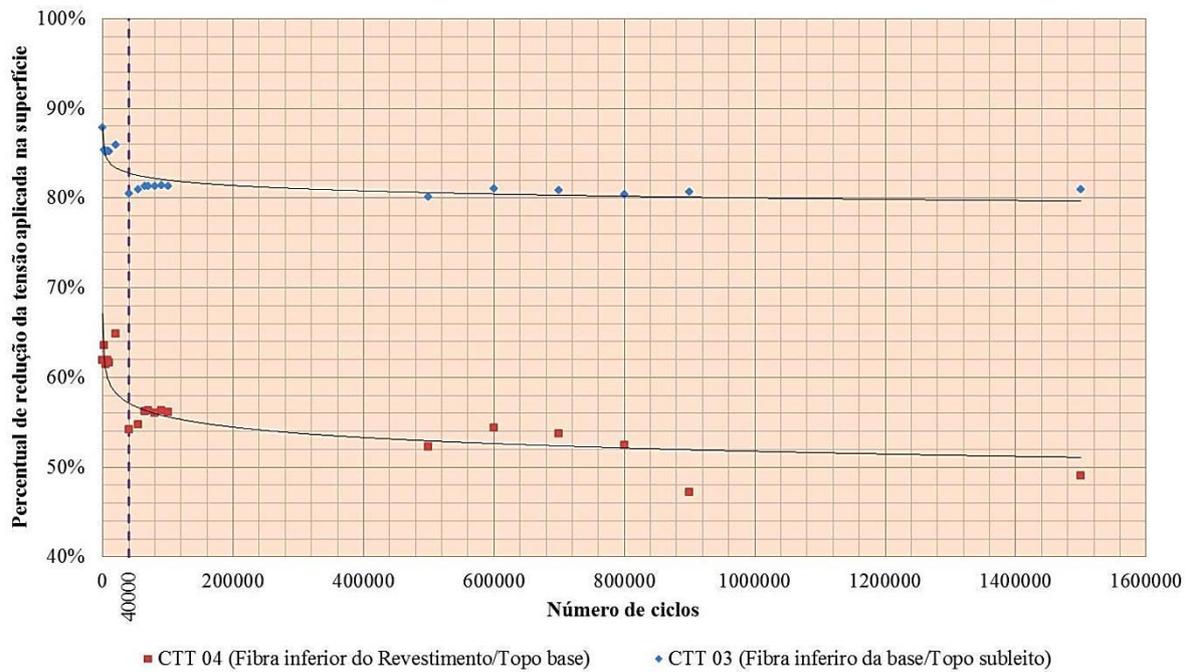


Figura 4.28. Percentual de redução da tensão aplicada em relação a CTT 04 e CTT 03

De maneira complementar o comportamento das tensões totais com relação a profundidade é mostrado na Figura 4.29, o resultado demonstra que as camadas mais superficiais (até 0,25 m) sofrem maior influência na variação das tensões ao longo dos ciclos de carregamento, diferentemente para pontos mais profundos dentro da camada de subleito.

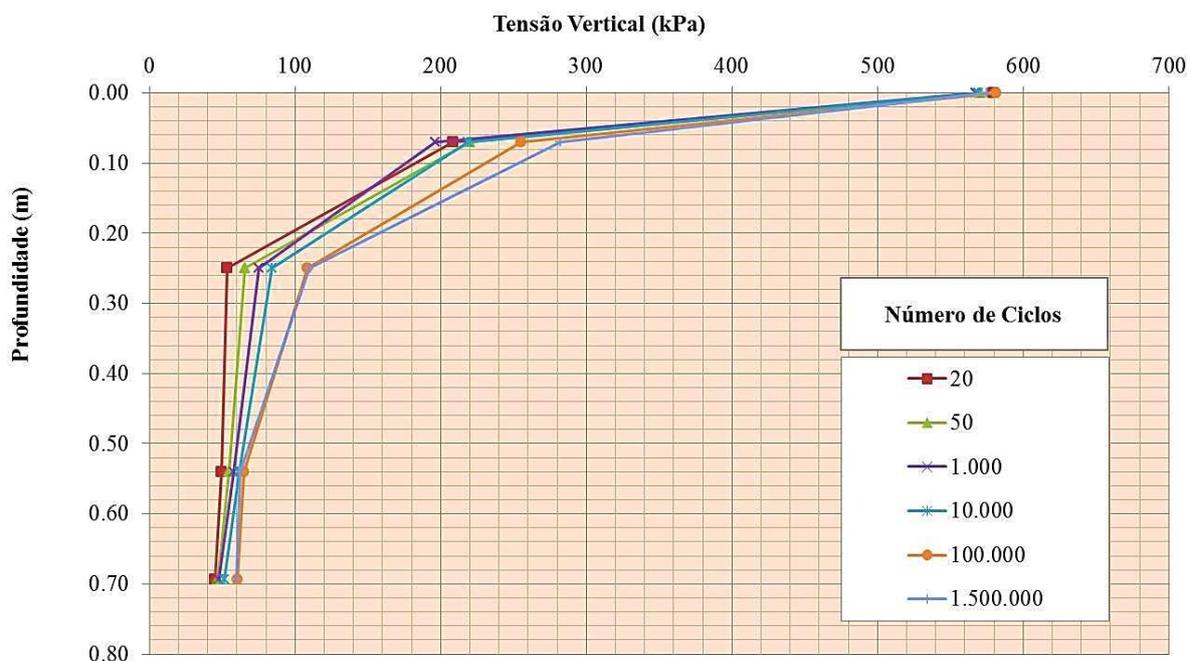


Figura 4.29. Desenvolvimento das tensões totais de acordo com a profundidade de leitura

Outra observação se aplica ao momento no qual os valores de tensão tendem a se estabilizar, isto corresponde para valores da ordem de 100 mil ciclos onde os valores de tensão obtidos são bem próximos aos obtidos para 1,5 milhões de ciclos. A possível justificativa desse comportamento se refere o maior grau de acomodação das partículas dos materiais que compõem a estrutura.

4.4.3 RETROANÁLISE DO MODELO FÍSICO

Assim, como os deslocamentos elásticos são referenciados para valores máximos e mínimos conforme descrito no item 4.4.2.1, os valores de tensão adotados para as análises também correspondem à diferença de valores máximos e mínimos. Justifica-se esse procedimento durante as análises elásticas devido às limitações do equipamento de aplicação de carga que para a frequência de ensaio não descarregava totalmente as cargas aplicadas, mantendo cerca de 20% para assegurar o contato entre placa e o revestimento.

Ao assumir esse procedimento, foi possível estabelecer as tensões máximas e mínimas para todos os pontos instrumentados. Salienta-se que para escolha dessas faixas de tensões, os trechos de ensaio escolhidos foram os que sofreram menor influência externa (início, paralisação e reinício de ensaio) e se mantiveram com valores constantes durante maior parte do ensaio. Então, ao assumir um número de ciclos igual a 100 mil que se encontra dentro da faixa de valores constantes, se possibilitou a definição das tensões para as análises elásticas, conforme Tabela 4.18:

Tabela 4.18. Valores máximos e mínimos de tensão totais para 100 mil ciclos

Profundidade (cm)	0		7		25		54		69,3	
Tensão (kPa)	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
	581,6	121,2	255,5	177,6	108,6	85,18	65,1	43,99	60,18	51,53
$\Delta\sigma$ ($\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}$)	460,4		77,9		23,5		21,1		8,7	

Dessa maneira, é importante observar que a tensão máxima a ser aplicada nas análises elásticas não corresponde aos 560 kPa referente ao semi-eixo padrão, mas sim aos 460,4 kPa obtidos da diferença entre a tensões máxima e mínima aplicada na superfície do pavimento do modelo experimental.

Os módulos que se ajustaram melhor ao comportamento da estrutura foram 1800 MPa para o revestimento, 500 MPa para base, 300 MPa para o solo referente a 2ª coleta e 45 MPa

para o solo referente a 1ª coleta. Estes valores finais de módulo são justificados mais adiante durante a retroanálise dos deslocamentos verticais elásticos.

Com relação à influência da aderência do concreto asfáltico em relação a parede da caixa foram obtidos os resultados da Tabela 4.19.

Tabela 4.19. Comportamento dos deslocamentos alternando as condições de contorno da camada de concreto asfáltico (CA)

Simulações axissimétricas (Modelo / Condições de vínculo)	Deslocamento Total (mm)	Distância ao ponto de aplicação (m) / Deslocamentos (mm)		
		0,25m	0,50m	0,80m
Caso (b) / com CA fixo	0,21	0,13	0,06	0,02
Caso (b) / com CA livre	0,21	0,14	0,07	0,04
Caso (a) / com CA fixo	0,19	0,11	0,04	0,00
Caso (a) / com CA livre	0,23	0,16	0,10	0,08

Dos resultados, conclui-se que a parede exerce influência nos deslocamentos registrados em pontos próximos à parede. No entanto, ao adotar a instrumentação na diagonal da caixa, torna-se a influência da parede mais reduzida, essa constatação inicial foi importante, pois foi o ponto de partida para a adoção de um caso mais representativo das análises efetuadas.

Pautado nas considerações até aqui descritas, optou-se em trabalhar com o caso (b) considerando a inexistência de aderência entre a camada asfáltica e parede da caixa experimental.

A partir de análises axissimétricas no modelo bi-dimensional, foi possível constatar que as tensões transmitidas ao pavimento são em, sua grande maioria, absorvidas pela camada de revestimento e conduzem a reduções significativas nas tensões transmitidas a camada de base e subleito. Quanto à magnitude dos deslocamentos, se observou que ocorreram deslocamentos máximos logo abaixo do ponto de aplicação de carga na ordem de 0,21 mm, o comportamento descrito acima é observado na Figura 4.30 a seguir.

O valor do raio de curvatura calculado a partir dos deslocamentos obtidos com as simulações no Plaxis foi igual a 409 m, comparando este resultado ao obtido por meio dos dados da instrumentação (ver Tabela 4.17), pode-se confirmar que os raios de curvatura do modelo físico e do obtido pelo PLAXIS possuem mesma ordem de grandeza, o que confirma a avaliação positiva das condições da estrutura quando submetida a $1,5 \times 10^6$ ciclos de carga, conforme preconiza a norma DNER-PRO 011/79.

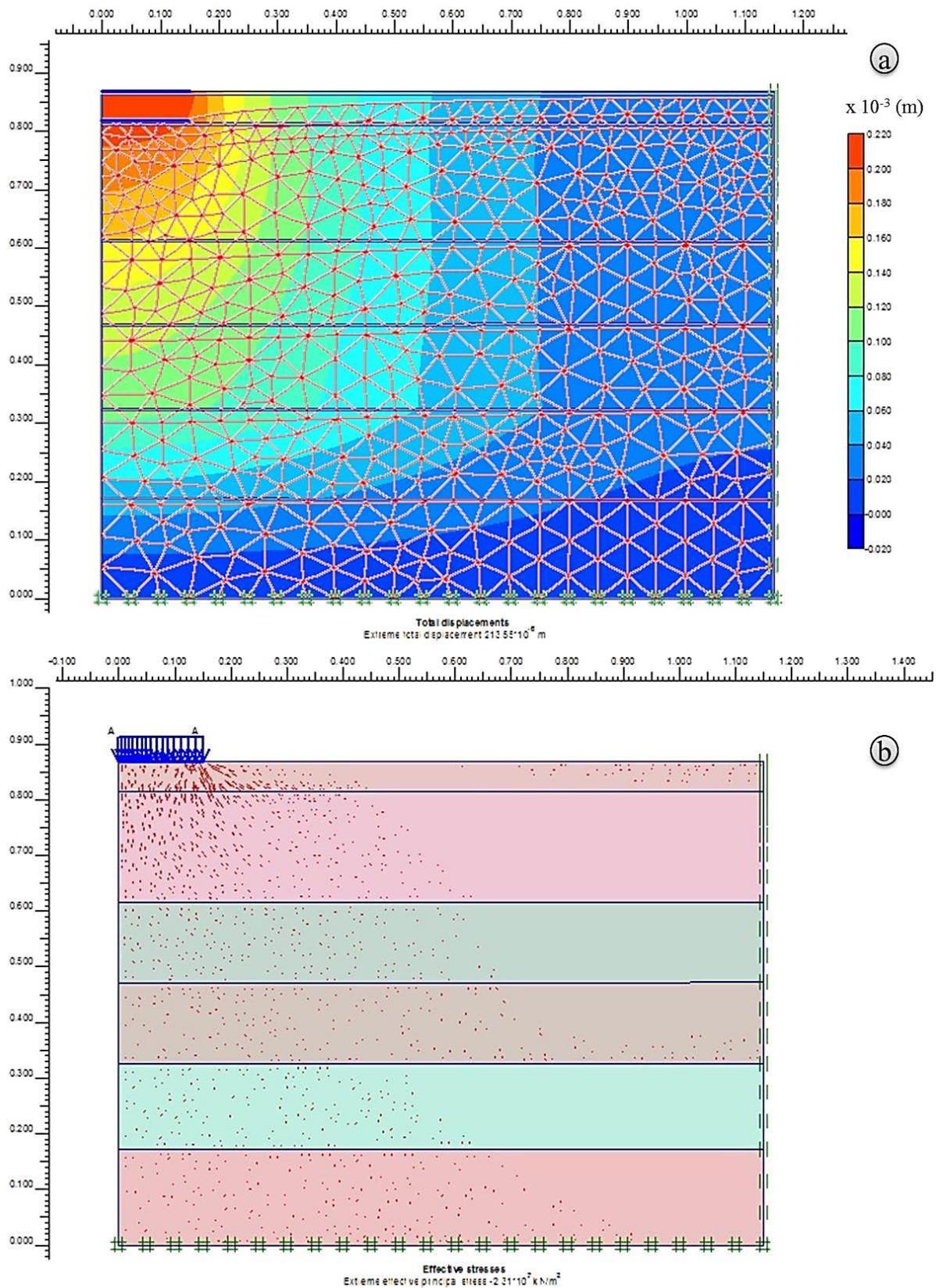


Figura 4.30. Simulação numérica no PLAXIS versão 7 do modelo físico: (a) deslocamento verticais e (b) tensões principais

4.4.3.1 RETROANÁLISE DA BACIA DE DESLOCAMENTO E DAS TENSÕES EM PROFUNDIDADE

De forma geral, a etapa de retroanálise consistiu na verificação do ajuste dos resultados numéricos com os dados experimentais em termos de bacias de deslocamento e tensões, para comportamentos elásticos. Os comportamentos da bacia de deslocamento e tensão para o modelo físico são apresentados nos dois gráficos ilustrados na Figura 4.31. Na ilustração abaixo, os valores de deslocamento são os descritos na Tabela 4.17 e os valores de tensão atuantes são os já discutidos na Tabela 4.18.

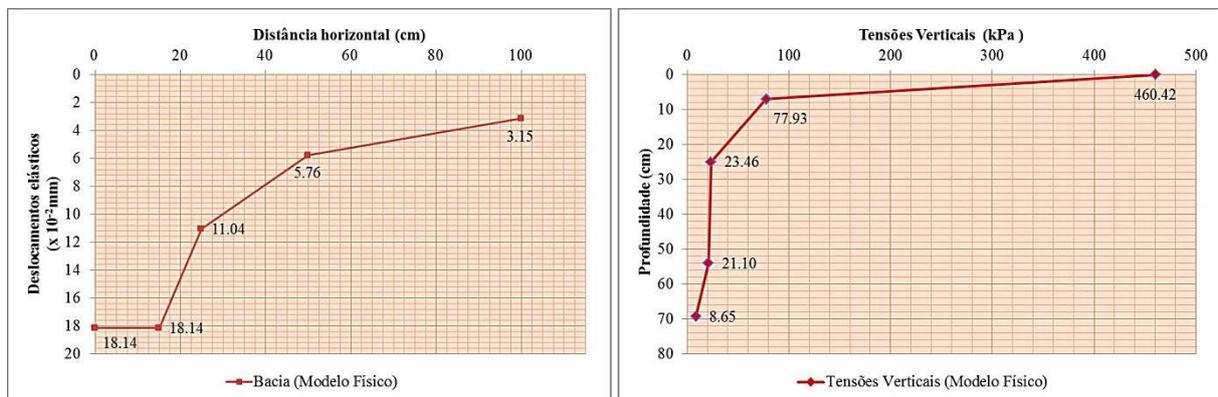


Figura 4.31. Deslocamentos e tensões verticais do modelo físico

Provenientes de dados experimentais os comportamentos de tensão e deslocamento foram comparados a soluções obtidas por meio do programa PLAXIS. Para uma melhor visualização do ajuste os resultados experimentais foram confrontados com os resultados numéricos, conforme Figura 4.32.

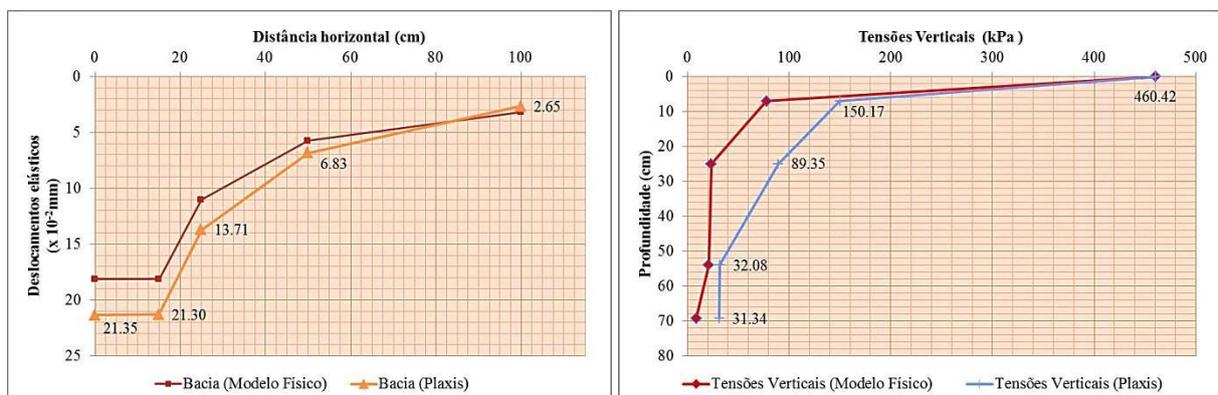


Figura 4.32. Deslocamentos e tensões verticais do modelo físico *versus* valores do Plaxis

Tomando como base o melhor ajuste o representado pela Figura 4.32, definiu-se que os valores de módulo correspondentes a este ajuste seriam os mais representativos para o comportamento da estrutura. Os valores de módulo para cada camada do modelo são os já descritos acima e correspondem a 1800 MPa para o revestimento, 500 MPa para camada de base, 300 MPa para as duas camadas de solo referente a 2ª coleta e 45 MPa para camadas de solo referente a 1ª coleta.

Quanto ao ajuste dos valores de tensão determinados com o PLAXIS em relação os valores da instrumentação pode-se concluir que se apresentou de maneira razoável, com maiores diferenças para os valores de tensão mais superficiais a sete e vinte e cinco centímetros de profundidade. Essa diferença provavelmente vem da dificuldade em simular numericamente o sistema de carregamento.

Ao comparar os valores iniciais de módulo (Tabela 3.4) existe uma discrepância para os valores da camada de base e para as duas camadas de solo referente a 2ª coleta. Dessa maneira, são descritas observações e justificativas para os valores finais de módulo:

- I. O módulo do revestimento foi considerado fixo em 1800 MPa valor correspondente ao determinado em laboratório.
- II. A mudança do módulo da base (RCD-R) de 144,5 MPa para 500 MPa justifica-se pela heterogeneidade do material, principalmente no que tange a distribuição granulométrica e teor de umidade. Isto dificulta uma boa proximidade entre o comportamento mecânico do modelo físico (grande escala) com o modelo universal, cujo comportamento mecânico do RCD-R foi calibrado em laboratório.
- III. O módulo de 45 MPa do subleito, referente ao solo da 1ª coleta, foi obtido a partir dos valores de calibração do modelo universal.
- IV. Diferente dos demais materiais o solo de subleito, referente à 2ª coleta, não foi ensaiado em laboratório conforme a norma AASHTO T307-99, para definição de um modelo constitutivo. Os baixos valores de módulo encontrados nas condições iniciais são justificados devido o uso do mesmo modelo utilizado para o solo da 1ª coleta, isso não conduziu para bons resultados já que os materiais possuem comportamentos distintos. Logo, para a definição dos 300 MPa como módulo desse material o procedimento executado consistiu em ajustar valores durante as retroanálises a partir de valores de referência encontrados na literatura. Cabe ressaltar que os valores iniciais partiram do trabalho de Batista (2007) cuja autora fez determinações de módulo para esse tipo material em campo onde obteve

valores médios próximos a 175 MPa. Ao assumir o módulo desta camada igual a 175 MPa, verificou-se um ajuste não satisfatório entre os valores do modelo físico e os numéricos (Figura 4.33).

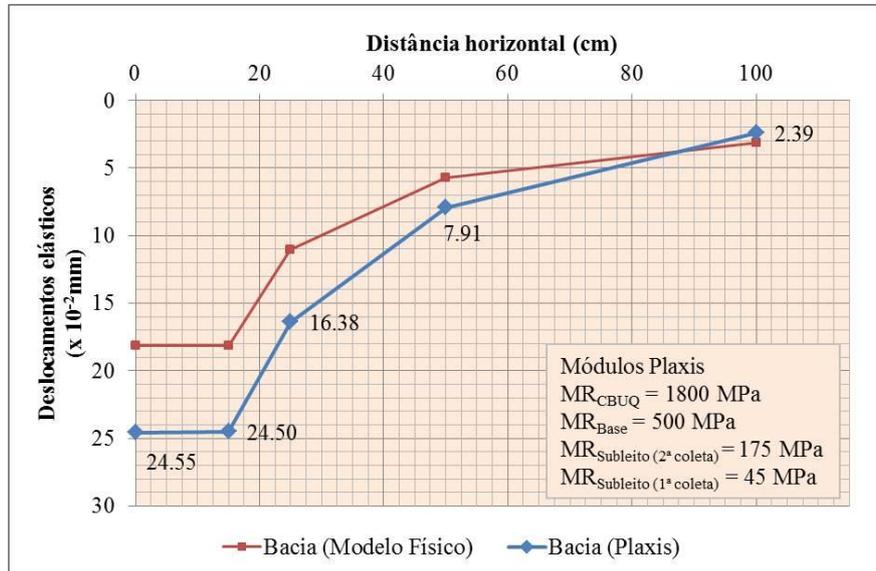


Figura 4.33. Verificação do ajuste dos deslocamentos verticais do modelo físico *versus* valores do Plaxis

Esse comportamento decorre da camada ter sido compactada com uma variação média de $-4,0\%$ (quatro por centos negativos) em relação a umidade ótima do material. Essa variação em relação à umidade ótima pode significar um acréscimo da rigidez do material da ordem de seis vezes o valor do módulo na umidade ótima, segundo o trabalho publicado por Takeda (2006).

Takeda (2006) avaliou a influência da variação da umidade pós-compactação no módulo de resiliência em um programa experimental onde o autor fez variar a umidade pós-compactação de trinta solos de rodovias do interior paulista. No trabalho ele chegou a correlações interessantes como representado na Figura 4.34 onde segue representada a relação entre $(MR/MR_{\omega_{\text{ótima}}})$ *versus* a variação de umidade $(\omega - \omega_{\text{ótima}})$ em relação a ótima. Onde: MR é o módulo de resiliência na umidade que se deseja avaliar, $MR_{\omega_{\text{ótima}}}$ é o módulo de resiliência na umidade ótima, ω é o teor de umidade em que se deseja avaliar o módulo de resiliência e $\omega_{\text{ótima}}$ é a umidade ótima.

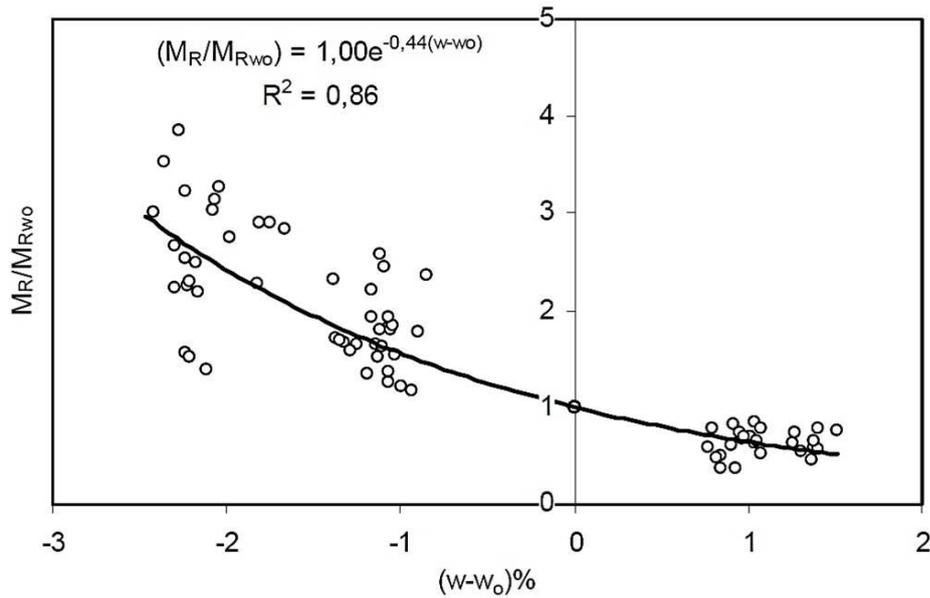


Figura 4.34. Variação do módulo de resiliência *versus* variação da umidade de ensaio (TAKEDA, 2006)

Da correlação proposta por Takeda (2006), é possível estimar que para uma amostra compactada na umidade ótima e que tenha um módulo de resiliência igual a 175 MPa o módulo pode chegar a valores de até 350 MPa se para este solo ocorrer um decréscimo de – 2 % (dois por centos negativos) em relação a umidade ótima. Contudo, esta abordagem não considera a influência do estado de tensão na variação do módulo de resiliência com a variação da umidade o que segundo o autor seria prudente para uma melhor previsão dos valores de módulo. Dessa forma, assumir que o valor de 175 MPa do material passa para um valor de 300 MPa não seria comprometedor para as análises devido a grande influência da umidade no comportamento da rigidez do material.

4.4.3.2 ANÁLISES DE PREVISÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE PARA CAMADA DE BASE

Os modelos numéricos desempenharam uma função importante na análise do desenvolvimento das tensões no pavimento e na definição das magnitudes das deformações elásticas, porém, o modelo linear elástico não fornece um comportamento real do material diante de carregamentos cíclicos, pois estes modelos não conseguem prever o acúmulo de deformações permanentes.

A partir do modelo de Monismith *et al.* (1975) e do modelo de Lentz & Baladi (1981), foi possível estabelecer o comportamento do acúmulo de deformações permanentes para a

camada de base. Esses dois modelos foram ajustados a dados de ensaio obtidos de um ensaio de deformação permanente realizado em uma amostra de RCD-R compactada na energia modificada, como ilustrado Figura 4.35.

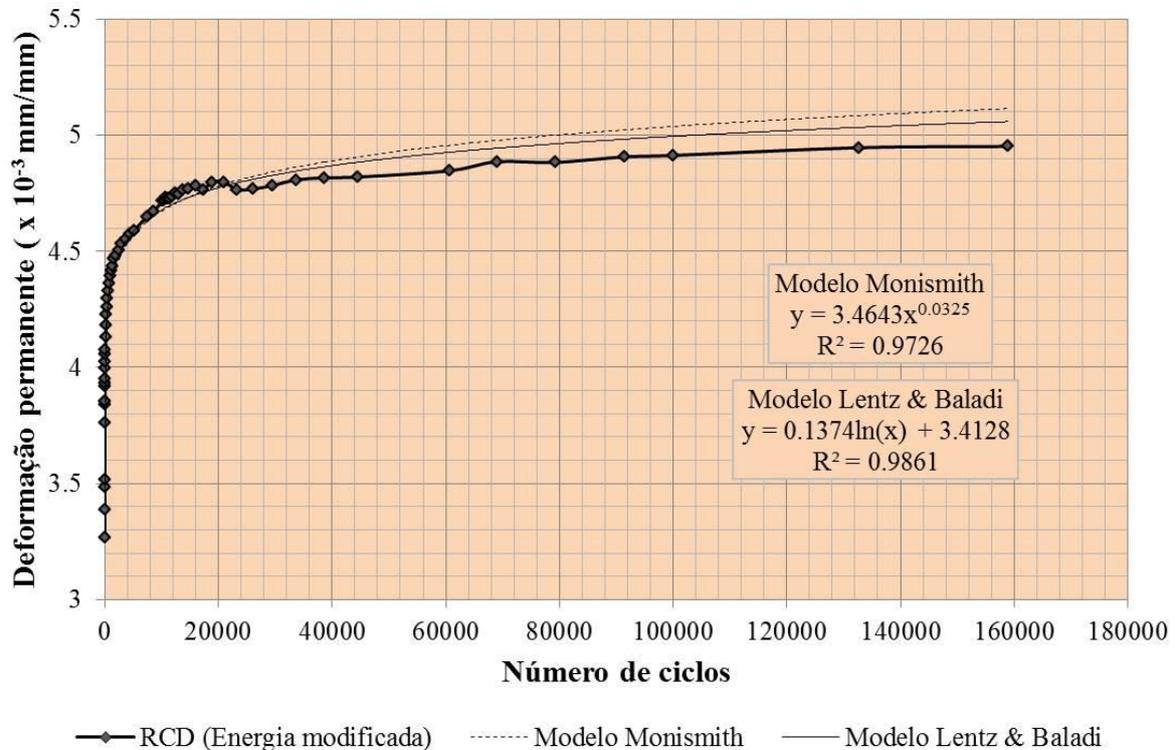


Figura 4.35. Ensaio de deformação permanente no RCD-R (modificado de Gómez², 2014)

O coeficiente de determinação R^2 encontrado para as funções de ajuste dos modelos se demonstrou alto, o que evidencia uma boa capacidade dos modelos em descrever o comportamento do RCD quanto a deformações permanentes. As Eq. (4.3) e Eq. (4.4), dos modelos de Monismith *et al.* (1975) e Lentz & Baladi (1981) são descritas abaixo, respectivamente:

$$\varepsilon_p = 3,4643 \cdot N^{0.0325} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

$$\varepsilon_p = 0,1374 \cdot \ln(N) + 3,4128 \quad \text{Eq. (4.4)}$$

onde ε_p é igual deformação específica plástica ($\times 10^{-3}$ mm/mm), e N número de repetições de carga.

² GÓMEZ, A. M. (2014). Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos. Tese de Doutorado em andamento.

Dos modelos, conclui-se que para 1,5 milhões de ciclos a deformação permanente apresentada pela camada de base (RCD-R) foi igual a $5,50 \times 10^{-3}$ mm/mm o que corresponde a um deslocamento plástico igual a 1,1 mm para toda camada de base, ou seja, dos 3 mm de deslocamentos plásticos apresentados por toda estrutura apenas 1,1 mm foi devido à acomodação do material de base. Os resultados de ajuste do comportamento de acúmulo de deformações permanentes efetuado para o ensaio de laboratório permitiu concluir que o modelo de Monismith *et al.* (1975) e de Lentz & Baladi (1981) se adaptam bem ao comportamento do material (RCD-R) e permitem aferir o comportamento da camada de base quando submetida aos ensaios no modelo físico, como representando na Figura 4.36.

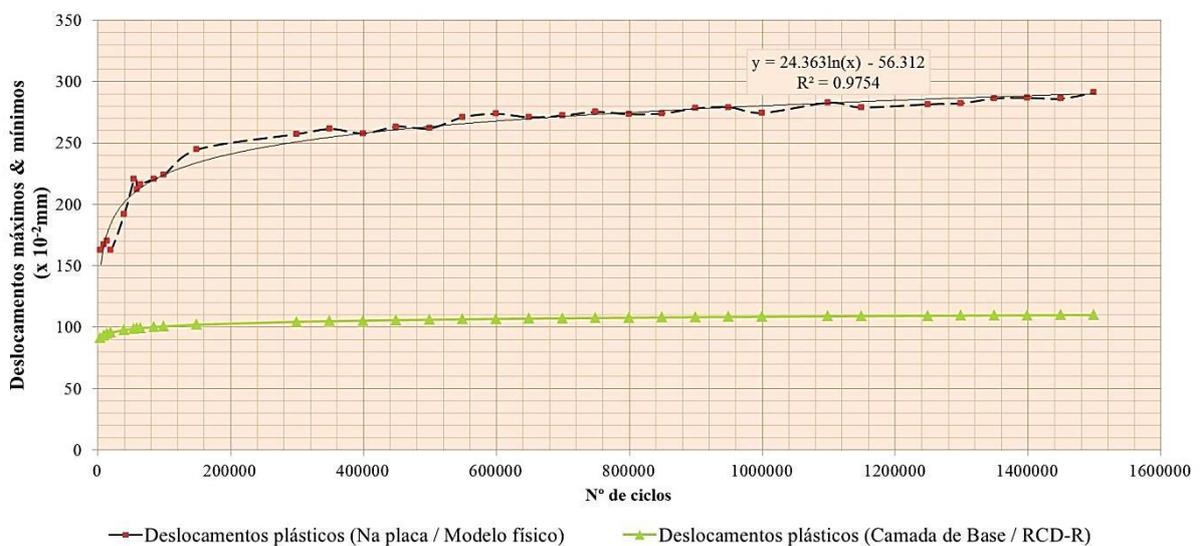


Figura 4.36. Deslocamentos plásticos acumulados no ponto de aplicação da carga *versus* os deslocamentos plásticos da camada de base

Como discutido neste trabalho (item 4.4.2.1), as leituras de deslocamento permanente do modelo físico foram efetuadas na superfície do revestimento o que traduziu o comportamento do acúmulo de deslocamentos permanentes de toda a estrutura. Este comportamento pode ser reescrito segundo duas funções (Eq. (4.5) e Eq. (4.6)), como demonstrado abaixo:

$$\delta_p = 63,07 \cdot N^{0.1084} \quad (R^2 = 0,96) \quad \text{Eq. (4.5)}$$

$$\delta_p = 24,363 \ln(N) - 56,312 \quad (R^2 = 0,98) \quad \text{Eq. (4.6)}$$

onde δ_p é igual deslocamento plástico ($\times 10^{-2}$ mm), e N número de repetições de carga.

Apesar do coeficiente de correlação das equações serem bem próximos aos valores dos deslocamentos plásticos para números de ciclos abaixo de 700 mil se apresentam menores para a Eq. (4.5) já para valores maiores que 700 mil ocorre uma inversão do comportamento, como está representado na Figura 4.37. Portanto, se o ajuste dos deslocamentos plásticos ao longo do ciclo de cargas for realizado por uma função logarítmica a concordância com os pontos experimentais é boa ao longo de toda a curva, desde baixos a altos valores de ciclos de carga.

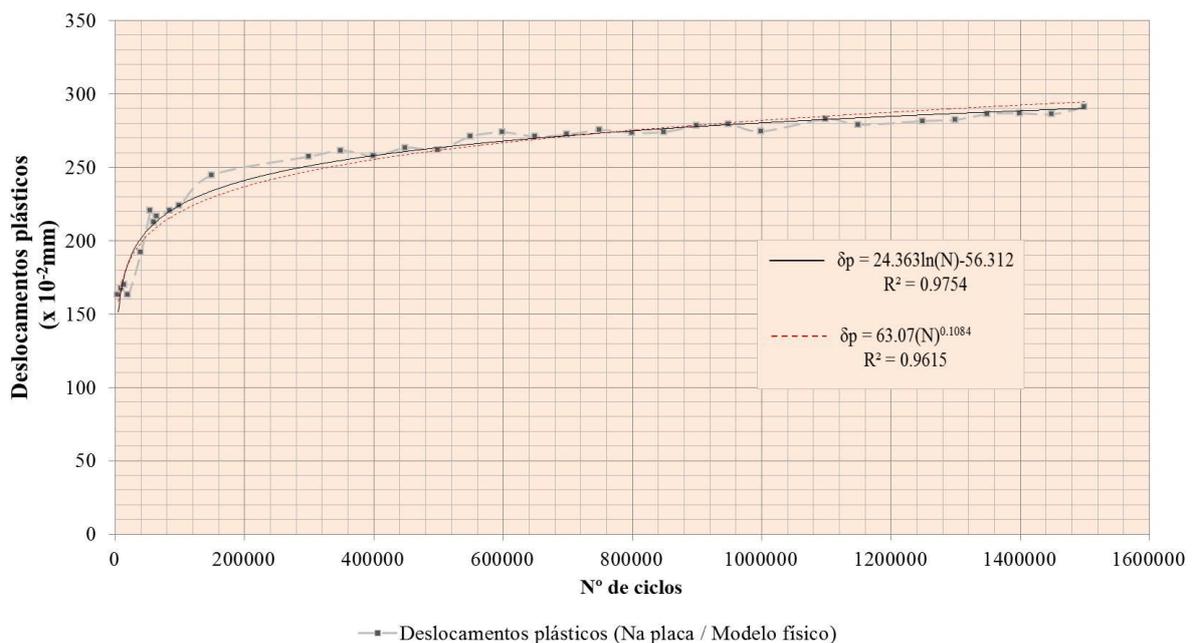


Figura 4.37. Comparação do comportamento dos deslocamentos plásticos do modelo físico por duas funções

Ao assumir como hipótese que a estrutura do modelo físico tenha sido submetida a ciclos de carregamento iguais a um tráfego pesado ($N = 5 \times 10^7$), é observada que na estrutura, para Eq. (4.5), os deslocamentos plásticos estariam da ordem de 4,31 mm e para Eq. (4.6) os deslocamentos plásticos seriam de 3,76 mm o que confirma a tendência de que os deslocamentos plásticos são maiores para a Eq. (4.5) quando o número de ciclos é superior a 700 mil. Por fim, pode-se concluir que o desempenho da estrutura de pavimento do modelo físico é muito bom, pois ao considerar a hipótese de um tráfego pesado a estrutura estaria ainda em boas condições.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para pesquisa futuras

5. CONCLUSÕES

Apesar do comportamento complexo devido sua heterogeneidade, o agregado reciclado (AR) proveniente do beneficiamento de resíduos da construção civil demonstrou características positivas e desejáveis para a sua aplicação em obras de infraestrutura rodoviária.

O agregado utilizado na pesquisa pode ser classificado como agregado de resíduo de concreto (ARC), o qual possui o somatório de materiais cimentícios e pétreo maior igual a 90%.

Como na pesquisa de Gómez (2011), houve dificuldade em se definir um pico na curva de compactação que se permite estabelecer valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo para o material. Assim, optou-se por critérios de trabalhabilidade para definição dos referidos pontos.

Todavia, durante os estudos realizados com o agregado reciclado foram observados excelentes desempenhos em relação aos critérios de suporte no tocante ao Índice de Suporte Califórnia (ISC) que apresentou valores superiores aos 60% exigidos para camadas de base, de acordo com as normas PMSP/SP ETS-001(2003) e na NBR 15115 (2004). Além de atender os limites mínimos das especificações colocadas anteriormente, o AR, mediante as especificações do manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes (DNIT), apresenta valores de ISC maiores que 80% exigidos e valores de expansão nulos.

Por outro lado, o alto valor de absorção 7,6 % encontrada para o agregado reciclado, objeto de estudo, implica de forma direta no teor de água a ser adicionada na compactação e consequentemente na trabalhabilidade deste material em campo, o que se pode traduzir a uma dificuldade de controle dos parâmetros de compactação.

Ao analisar do ponto de vista da aplicabilidade do agregado, ao executar ensaios de abrasão Los Angeles, verifica-se que o mesmo se encontra com valores de abrasão dentro do limite exigido tanto para sua aplicação em camadas de base e revestimento.

Outras características interessantes com relação a forma, textura e angularidade foram obtidas a partir dos ensaios realizados com o aparelho AIMS, as análises demonstram que o material apresenta pontos positivos acerca dessas características como: uma alta cubicidade, ou seja, partículas equidimensionais ou angulosas, um alto nível de rugosidade das partículas o que melhora trabalhabilidade deste material e um maior entrosamento entre as partículas que traduz a materiais com melhor comportamento mecânico, seja quando aplicado em misturas asfálticas, seja quando aplicados em camada granular de base de uma estrutura do pavimento.

Os valores de módulo de resiliência do RCD-R segundo os procedimentos da AASHTO T307-99 se encontram em uma faixa de valores que vai de 50 a 300 MPa com valor médio igual a 140MPa, para a energia de compactação Proctor modificado. Ao comparar estes valores ao definido para o modelo físico durante as retroanálises (500 MPa) observa-se a variabilidade do comportamento mecânico do material devido a heterogeneidade do RCD-R.

Quanto à avaliação do desempenho da estrutura do modelo físico pode-se concluir que apesar do controle de compactação apresentar deficiências, os valores das instrumentações apontaram para um bom comportamento da estrutura do modelo físico. Com os deslocamentos plásticos iguais a 2,75 mm determinados no ponto de aplicação da carga e para um número de ciclos igual a 1×10^6 se verifica o bom comportamento da estrutura em relação ao limite crítico de afundamento para um pavimento.

O comportamento dos deslocamentos plásticos a partir de 1×10^5 ciclos indica que a taxa de deformação decresce até um valor nulo evidenciando a ocorrência do comportamento de *Shakedown* plástico. Para os deslocamentos elásticos obtidos na superfície do revestimento foi possível verificar que a estrutura do pavimento para o número total de ciclos do ensaio estaria em condições estruturais ainda boas segundo o critério da norma DNER PRO 011/79.

As taxas de acréscimos de tensão se estabilizam para valores acima de 1×10^5 ciclos onde a partir desse número de ciclos os acréscimos são relativamente constantes. As tensões registradas na parte inferior da camada de base foram 82% menores que a tensão aplicada na superfície do revestimento o que demonstra o bom desempenho do revestimento e base para redução das tensões a serem transmitidas para o subleito.

Os ajustes realizados durante as retroanálises demonstraram que os valores de módulo da base e do subleito (referente ao solo da 2ª coleta) possuem valores maiores que os considerados inicialmente. Estes valores de módulo permitiram concluir que a estrutura tinha uma maior capacidade suporte do que previsto inicialmente. Dessa forma, a camada de subleito referente ao solo da 2ª coleta acabou funcionando como uma camada de sub-base.

Por fim, as análises de deformação e deslocamentos permanentes permitiram concluir que o modelo experimental tanto a estrutura como a camada de base teria condições de suportar mais ciclos de carga sem atingir critérios limites de intervenção para pavimentos flexíveis.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Avaliar mais composições granulométricas do RCD-R para uso em pavimentação com o objetivo de verificar a variabilidade dos parâmetros mecânicos e físicos do material.
- Simular a influência da variação da umidade no comportamento mecânico do modelo físico, incluindo a instalação de medidores de umidade e sucção.
- Efetuar comparativo entre estruturas construídas com agregados convencionais em relação a estruturas construídas com RCD-R.
- Aproximar as avaliações do emprego do RCD-R em condições mais próximas as aplicadas em campo com o emprego de simuladores de tráfego ou construção de trechos experimentais devidamente instrumentados.

Avaliação do índice de quebra do AR quando submetido a compactação de campo.

Referências Bibliográficas

- AASHTO. (1999). American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 307-99: Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.
- AASHTO. (2002). American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for Mechanistic-Empirical Design, Washington, DC.
- ABDOU, M. R., & Bernucci, L. L. (s.d.). Pavimento Ecológico: uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades. <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/pavimento_ecologico.pdf> Acesso: 31/08/2010.
- ABNT. (1983). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.
- ABNT. (1984a). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.
- ABNT. (1984b). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6465: Agregados - Determinação da abrasão "Los Angeles".
- ABNT. (1984c). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica.
- ABNT. (1984d). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.
- ABNT. (1984e). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.
- ABNT. (1986a). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- ABNT. (1986b). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.
- ABNT. (1987). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia.
- ABNT. (2004a). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (2004b). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ.

- ABNT. (2004c). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil-Áreas de reciclagem-Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (2004d). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (2004e). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (2004f). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT. (2004g). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
- AFNOR. (1991). NF P 98-250-2 Preparation des Melandes Hydrocarbones, Parte 2: Compactage des plaques.
- AMIRI, H., NAZARIAN, S., & FERNANDO, E. (2009). Investigation of Impact of Moisture Variation on Response of Pavements through Small-Scale Models. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 21, No. 10, October 1, pg. 553-560.
- AMORIM, E. F. (2013). Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-090/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.
- ANP. (2005). Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP Nº19, de 11 de julho de 2005.
- ANTUNES, L. G. (2008). Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 166/08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158p.
- ARAÚJO JR., E. D., GUSMÃO, A. D., & SUKAR, S. F. (2010). Uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Estacas de Compactação para Melhoramento de Solos. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS*.
- BALZAN, D. C., GALLETTI, F. V., MELO, V. L., & PIRES, L. M. (2003). Utilização de agregado reciclado de obras de construção civil em pavimentos urbanos: Especificação e obras no município de São Paulo. *12.ª Reunião Anual de Pavimentação (12.ª RAPv)- Aracajú/SE*.
- BARBOSA, M. C., AFFONSO, F. J., & BARROS, M. C. (2008). Caracterização de Agregados Reciclados de RCDs para Uso em Coberturas e Sistemas de Drenagem de Aterros de Resíduos. *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ*, pp. 1111-1117.
- BATISTA, L. C. (2007). Determinação de parâmetros de deformabilidade de camadas de um pavimento a partir de ensaios de campo. Dissertação de Mestrado, G.DM-159/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 182p.

- BERNUCCI, L., MOTTA, L., CERATTI, J., & SOARES, J. (2006). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 504 f. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.
- BESSA, I. S. (2010). Caracterização de agregados e misturas asfálticas utilizando o processamento digital de imagens. Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil, Fortaleza, CE, 67 p.
- BLANKENAGEL, B. J., & GUTHRIE, W. S. (2006). Laboratory characterization of recycled concrete for use as pavement base material. *Transportation Research Record*, Washington, n.1952, p.21-27.
- BRAGA, R. M., FILHO, W. M., & GONÇALVES, A. P. (2008). A Gestão Dos Resíduos da Construção e Demolição em Belém - Resolução Conama 307/02. *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ*, pp. 1034-1038.
- CONAMA. (2002). Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução CONAMA nº 307. Brasília, DF.
- CONAMA. (2004). Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução CONAMA nº 348. Brasília, DF.
- CONAMA. (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução CONAMA nº 431. Brasília, DF.
- CREA-SP. (2005). Guia profissional para uma gestão correta dos resíduos da construção. São paulo, SP: Coordenadores, Tarcísio de Paula Pinto, Juan Luís Rodrigo González. Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado de São Paulo.
- DAVE, T. N., & DASAKA, S. (2013). In-house calibration of pressure transducers and effect of material thickness. *Gemomechanics and Engineering*. Vol. 5, No. 1, pg. 1 -15.
- DELGADO, A. K. (2002). Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. Dissertação de Mestrado, G.DM-093A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.
- DELONGUI, L., PINHEIRO, R. J., PEREIRA, D. D., & PIOVEZAN, G. T. (2010). Caracterização dos Resíduos da Construção Civil em Santa Maria (RS) e sua Aplicação em Pavimentação. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS*, pp. 1-7.
- DEMERCHANT, M., VALSANGKAR, A., & SCHRIVER, A. (2002). PLate load tests on geogrid-reinforced expanded shale lightweight aggregate. *Geotextiles and Geomembranes* 20. pg. 173-190.
- DNER. (1979). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - PRO 011/79: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis.
- DNER. (1994a). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 049/94: Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.
- DNER. (1994b). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 078/94: \ Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso.
- DNER. (1994c). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 086/94: Agregado - determinação do índice de forma.

- DNER. (1998a). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 035/98: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles".
- DNER. (1998b). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 081/98: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.
- DNER. (1998c). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - ME 194/98: Agregados determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.
- DNIT. (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.
- DNIT. (2010). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes 141/2010 - ES: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.
- DNPM, D. N. (2009). *Economia Mineral do Brasil*. Coordenação. Antonio Fernando da Silva Rodrigues - Brasília/DF, 764 p.
- FARIAS, M. M. (2009). Materiais reciclados para utilização em pavimentação. *Projeto - PRONEX*. Brasília, DF.
- FARIAS, M. M., SINISTERRA, F. Q., JIMÉNEZ, A. M., SOUZA, M. V., & FALCÃO, P. R. (2012). Influence of Asphalt Rubber on the Crushing of Recycled Aggregates used in Dense HMA. Munich, Germany: Proceedings of the Asphalt Rubber 2012 Conference.
- FERNANDES, C. D. (2004). Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação. Rio de Janeiro, RJ: Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 109p.
- FROTA, C. A., MELO, D. M., & NUNES, F. R. (2005). Estudo de Creep de misturas asfálticas com resíduo processado da construção civil. *36.ª Reunião Anual de Pavimentação (36.ª RAPv)- Curitiba/PR*.
- FROTA, C. A., MENTA, C. D., & NUNES, F. R. (2003). Utilização de entulho reciclado em misturas asfálticas para a região de Manaus-AM. *12.ª Reunião de Pavimentação Urbana (12.ª RPU)- Aracajú/SE*.
- GOLDENSTEIN, S. (2003). Meio ambiente e resíduos sólidos da construção civil. *Sinduscon – SP: Notícias da Construção*, 5-6.
- GÓMEZ, A. M. (2011). Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação. Brasília, DF: Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-196/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p.
- GÓNGORA, I. A. (2011). Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. Brasília, DF: Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-190/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 76 p.
- GUIMARÃES, A. C. (2009). Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Rio de Janeiro, Brasil: Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 352 p.

- GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo de desempenho de estacas escavadas. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-091A/02. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- HENDRIKS, C. F., NIJKERK, A. A., & KOPPEN, A. E. (2007). *O ciclo da construção*. Brasília: Amorim e Rosana Stockler Campos Clímaco, tradução, Editora Universidade de Brasília, 250 p.; 24 cm.
- JOHN, V. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese (Livre-Docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 102 p.
- KAKUDA, F. M. (2010). Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-graduação em engenharia de transportes, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 290 p.
- KEELER, M., & BURKE, B. (2010). *Fundamentos de Projetos de Edificações Sustentáveis*. Porto Alegre: Tradução: Alexandre Salvaterra; Bookman; 362p.
- LEITE, F. D. (2007). Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo / SP, 185 p.
- LEITE, F. D., BERNUCCI, L. L., MOTTA, R. D., MOURA, E. D., & ABDU, M. R. (2007). Efeitos da compactação nas propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. *38.ª Reunião Anual de Pavimentação (38.ª RAPv) / 12.º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (12.º ENACOR) - Manaus/AM*.
- LEITE, F. D., MOTTA, R. D., BERNUCCI, L. L., MOURA, E. D., & ABDU, M. R. (2006). Comparação de valores de índice de suporte califórnia de agregados reciclados de resíduo sólido da construção civil. *13.ª Reunião de Pavimentação Urbana (13.ª RPU) - Maceió/AL*.
- LEITE, M. B. (2001). Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: 270 p.
- LING, H. I., & LIU, Z. (2001). Performance of Geosynthetic-Reinforced Asphalt Pavements. *Journal of Geoenvironmental Engineering*. Vol. 127, No. 2, February - pg 177-184.
- LOURENÇO, V. M. (2015). Estudos com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para utilização em misturas asfáltica tipo CAUQ. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 91p.
- MACÊDO, J. A. (1996). Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado em engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 477p.
- MACEDO, J. A., LEITE, H. E., MONTEIRO, V. E., & MOTTA, L. M. (2008). Diagnóstico e Potencialidades de Reaproveitamento dos RCD's para fins de Pavimentação no Estado

- da Paraíba. *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ*, pp. 2068-2075.
- MACEDO, T. F., & LAFAYETTE, K. P. (2010). Influências das fibras de polipropileno no comportamento mecânico de amostras de resíduos da construção civil. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS*.
- MEDEIROS JR., R. A., GUSMÃO, A. D., & FUCALE, S. P. (2010). Investigação Laboratorial do Uso de Resíduo da Construção Civil como Agregado Graúdo em Estaca de Compactação “Argamassada”. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS*, pp. 1-8.
- MEDINA, J., & MOTTA, L. M. (2005). *Mecânica dos Pavimentos. Mecânica dos Pavimentos*. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2º edição.
- MEDINA, J., MOTTA, L. M., & CERATTI, J. A. (1986). Estudos de resiliência na mecânica dos pavimentos. *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- MONISMITH, C. L., OGAWA, N., & FREEME, C. (1975). Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. 54º Annual Meeting of TRB. Washington.
- MOREIRA, J. F., DIAS, J. F., & REZENDE, M. E. (2006). Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG. *13.ª Reunião de Pavimentação Urbana (13.ª RPU) - Maceió/AL*.
- MOTA, N. M. (2003). Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335p.
- MOTTA, L. M., & FERNANDES, C. (2003). Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. *12.ª Reunião Anual de Pavimentação (12.ª RAPv)- Aracaju/SE*.
- MOTTA, R. D. (2005). Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 134f.
- MOURA, E. D. (2010). Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pistas e em laboratório. / E. De Moura. – ed.rev.- São Paulo. 299 p.
- MUÑETÓN, C. M. (2013). Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-083A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília,DF, 161 p.
- OIKONOMOU, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Concrete & Cement Composites*. 27, pp. 315 – 318.
- OLIVEIRA, J. C. (2007). Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-049/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167 p.

- OLIVEIRA, J. C., REZENDE, L. R., GUIMARÃES, R. C., & CARVALHO, J. C. (2005). Variação dos parâmetros de compactação e CBR de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. *36.^a Reunião Anual de Pavimentação (36.^a RAPv)-Curitiba/PR.*
- ONG-EcoAtitude. (s.d.). *ECO Atitude - Ações Ambientais*. Acesso em 24 de Agosto de 2010, disponível em <http://www.ecoatitude.org/site.htm>.
- PALMEIRA, E. (1996). Instrumentação geotécnica. *Publicação No. GAP 005A/96*. Brasília-DF.
- PALMEIRA, E. M. (2010). Soluções de Baixo Custo Envolvendo Geossintéticos e Materiais Alternativos em Obras Geotécnicas e de Proteção Ambiental. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Gramado/RS*, pp. 1-24.
- PAPAGIANNAKIS, A. T., & MASAD, E. A. (2007). *Pavement Design and Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- PERKINS, S. (1999). Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements. *Geosynthetics International*, Vol. 6, No. 5, pp. 347-382.
- PINTO, T. D. (s.d.). Bacias de captação de resíduos sólidos - Instrumento para uma gestão sustentável.
<http://www.ietsp.com.br/uploads/text/2/bacias_de_captacao_de_residuos_solidos.pdf
> Acesso: 31/08/2010.
- PMSP. (2006). Decreto N° 48.075. São Paulo, SP, Brasil.
- PMSP/SP.ETS-001. (2003). Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.
- PREUSSLER, E. S. (1986). A consideração da resiliência dos solos em projetos de pavimentos. *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- PROENÇA, F. T., SILVA, R. C., FUCALE, S. P., & RABBANI, E. K. (2012). Análise das características físicas de bica corrida reciclada de resíduos da construção civil (RCC) para uso em pavimentação. *XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg)*. Porto de Galinhas, PE.
- QUINONES, F. S. (2014). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-099/14, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.
- RESPLANDES, H. D., & REZENDE, L. R. (2007). Estudo do comportamento estrutural de pavimentos flexíveis construídos com agregado reciclado. *38.^a Reunião Anual de Pavimentação (38.^a RAPv) / 12.^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (12.^o ENACOR) - Manaus/AM.*
- RIBEIRO, F., & REZENDE, L. R. (2006). Avaliação do comportamento estrutural de uma via com aplicação de entulho em sua base. *13.^a Reunião de Pavimentação Urbana (13.^a RPU) - Maceió/AL.*
- RIBEIRO, F., SERRA, N. G., REZENDE, L. R., & GUIMARÃES, R. C. (2002). Utilização de entulho da construção civil em pavimentos flexíveis. *11.^a Reunião de Pavimentação Urbana (11.^a RPU) - Porto Alegre/RS.*

- ROCHA, E. G. (2006). Os Resíduos Sólidos de Construção e Demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (2006), E.DM – 002A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p.
- SANTOS, E. C. (2007). Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) em Estruturas de Solo Reforçado. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 168p.
- SANTOS, E. C., VILAR, O. M., & ASSIS, A. P. (2008). Análise Estatística dos Parâmetros Geotécnicos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ*, pp. 1507-1514.
- SILVA, A. L., GUIMARÃES, R. C., MANSO, E. D., & REZENDE, L. R. (2006). Aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pista experimental de Goiânia. *13.^a Reunião de Pavimentação Urbana (13.^a RPU) - Maceió/AL*.
- SILVA, B. H. (2009a). Análise Mecânica de um Pavimento Rodoviário Submetido à Oscilação do Lençol Freático Simulada em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 304 p.
- SILVA, C. A. (2009b). Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 194 p.
- SILVA, M. G., SILVA, B. T., & BARROSO, S. H. (2008a). Um primeiro estudo dos resíduos de construção e demolição da construção civil para aplicação em camadas de pavimentos na cidade de Fortaleza. *15.^a Reunião de Pavimentação Urbana (15.^a RPU) - Salvador/BA*.
- SILVA, T. C., FUCALE, S. P., GUSMÃO, A. D., & FERREIRA, S. R. (2008b). Ensaio de Caracterização e Resistência em Resíduos da Construção Civil. *XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg) - Búzios/RJ*, pp. 1147-1154.
- SOUZA, M. V. (2010). Avaliação e aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) aplicados em pavimentação. *Seminário de doutorado em geotecnia*. Brasília, DF.
- SOUZA, M. V., SINISTERRA, F. Q., FARIAS, M. M., & GÓMEZ, A. M. (2012). Avaliação mecânica de um concreto betuminoso usinado a quente confeccionado com agregado de Resíduo de Demolição Reciclado. *XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Cobramseg)*. Porto de Galinhas, PE.
- TAKEDA, M. D. (2006). A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 276p.
- THEROUX, B., LABUZ, J. F., & DRESCHER, A. (2000). Calibration of an earth pressure cell. *Final Report*. Minnesota Department of Transportation, pg. 114.
- UZAN, J. (1985). Characterization of granular material. TEE 1022. Transportation Research Board.

- VASCONCELOS, M. A., SILVA, B. T., SILVA, M. G., & BARROSO, S. H. (2009). Investigações sobre o uso de resíduos nas camadas granulares e na imprimação betuminosa de pavimentos rodoviários. *16.ª Reunião de Pavimentação Urbana (16.ª RPU) - Belo Horizonte/MG*.
- VIEIRA, G. L., MOLIN, D. C., & LIMA, F. B. (2004). Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. *Revista Engenharia Civil*. Universidade do Minho. Número 19. p. 5-18.
- VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S., BELIGNI, M., & CINCERRE, J. R. (2000). *Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas*. São Paulo: ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação.
- WERKMEISTER, S. D. (2004). Pavement Design Model for Unbound Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering*, 130(5), 665–674. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:5(665).
- ZHI GANG LUO, S. Y. (2012). A Circular Track Full-scale Testing Study on Permanent Deformation of Asphalt Pavement. ASCE, CICTP 2012: pg 3122-3131.