JOÃO PAULO BARBOSA CARVALHO

ESTUDO LABORATORIAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO EM REATERRO DE VALAS

São Paulo

2020

JOÃO PAULO BARBOSA CARVALHO

ESTUDO LABORATORIAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO EM REATERRO DE VALAS

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Profa. Dra. Rosângela dos Santos Motta

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Carvalho, João Paulo Barbosa
Estudo laboratorial do comportamento mecânico de agregados reciclados para aplicação em reaterro de valas / J. P. B. Carvalho -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.agregado reciclado 2.dutos enterrados 3.rigidez 4.deformação permanente 5.pavimento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Ao meu alicerce desta trajetória:

Maria do Socorro, Juarez e Maria Tereza.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Aos meus pais, Maria do Socorro e Juarez, por serem meu alicerce nesta caminhada e por serem meus exemplo de amor e humanidade. Sem os seus ensinamentos nada disso teria sentido.

À minha irmã Maria Tereza, que sempre me apoio nas minhas decisões e por me ajudar de forma direta e indireta a concretização de mais um sonho.

Ao meu namorado Ricardo Martinez, que passou por todas as etapas da minha vida acadêmica e social nesta selva de pedra chamada São Paulo, agradeço a ti por ser este companheiro que sempre sonhei.

À minha orientadora Profa. Dra. Rosângela Motta, por confiar em meu trabalho, por sempre transmitir tranquilidade e positividade em suas palavras, e pelo carinho e orientação durante todo o mestrado.

À Profa. Dra. Liedi Bernucci, por ser esta mulher inspiradora, acolhedora, ícone do conhecimento na área de pavimentação e elegante que contagia todos em sua volta.

À Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos, por sempre alegrar e motivar a todos do laboratório, agradeço por contribuir para o meu crescimento acadêmico e pessoal, além de todas as vivências fora e dentro da vida acadêmica.

Aos meus professores da Universidade Federal do Tocantins, Msc. Janaina Araújo, Dr. Marcus Vinicius Ribeiro, Dr. Lilian Fontes, por serem meus exemplos na área de Engenharia de Transportes e abrirem os meus olhos para este universo, além de todos os incentivos para seguir na vida acadêmica.

Agradeço aos pesquisadores, técnico e funcionários do LTP-EPUSP: Prof. Dr. Edson de Moura, Prof. Msc. Robson Costa, Prof. Dr. José João Pires, Diomária Santos, Erasmo Alves, Higor Moreira e Lucas Santos, pelo empenho em fazer acontecer esta dissertação, além de todo acolhimento e carinho em todos os dias no LTP.

Aos meus eternos amigos acadêmicos e pessoais do LTP-EPUSP: André Kazuo, André Siqueira, André Fardin, Andréia Cargnin, Antonio Merheb, Camila Christine, Daianne Diógenes, Deise Dias, Fernanda Carvalho, Fernanda Glader, Gabriel de Souza, Guilherme Barbosa, Guilherme Pereira, Guilherme Martins, Gustavo Pinheiro, Iuri Bessa, Ingrid Camargo, Jean Rafael Silva, João Paulo Meneses, Júlia Rodrigues, Laura Mazzoni, Leidy Ruiz, Larissa Zipoli, Lucas Andrade, Marcia Takahashi, Marina Frederich, Matheus Gaspar, Paulo Moraes, Raíssa Farias, Rafael Mota, Rodrigo Resende, Talita Alves, Zila Mascarenhas que fizeram parte dos pontos altos e baixos desta jornada, que tornaram mais leve o caminho e que mesmo após o término o carinho e amizade prevalecerá.

Aos admiráveis e adoráveis professores: Dra. Laura Motta, Dra. Patrícia Silva, Dra. Ana Paula Furlan e Dra. Washington Núñez pelas contribuições nas bancas de qualificação e defesa desta dissertação, este trabalho também tem a parcela de colaboração de vocês.

Aos professores docentes da Universidade de São Paulo: Dr. Ettore Bottura, Dr. Felipe Kabbach Junior, Dr. Carlos Suzuki, Dr. José Tadeu Balbo, Dr. Sergio Angulo e Dr. Antonio de Figueiredo, pela oportunidade de compartilhar conhecimentos valiosos na área de pavimentação e construção civil.

Aos meus amigos e familiares de Tocantins, Goiás, Brasília, Rio de Janeiro, Ceará, São Paulo, Minas Gerais e Portugal por ouvirem os meus desabafos e por vibrarem comigo tantas vitórias como esta.

À Prefeitura da USP – Campus Capital, em nome do Prefeito Hermes Fajersztajn e ao Engenheiro Douglas Costa, pela doação do resíduo de construção e demolição utilizado nesta pesquisa

À Empresa Fremix, em nome do Engenheiro Valmir Bonfim, pela doação do material fresado utilizado nesta pesquisa.

À Engenheira Priscila Rossini, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, pelo treinamento de reaterro de valas e por sanar dúvida advinda de normativos e instalações de tubulações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), pela concessão de bolsas de fomento à pesquisa.

“Na vida, não vale tanto o que temos,
nem tanto importa o que somos.
Vale o que realizamos com aquilo que possuímos e,
acima de tudo, importa o que fazemos de nós!”
Chico Xavier.

RESUMO

A geração, reciclagem e aplicação de agregados reciclados vem se consolidando cada vez mais a nível internacional. O Brasil tem avançado na reciclagem destes materiais, entretanto seu emprego não está caminhando com a mesma relevância. A pavimentação absorve grande parte destes materiais, na utilização de camadas de base e sub-base, uma vez que não necessita de muitos processos avançados de reciclagem para a sua aplicação. O uso em preenchimento de valas em pavimentos é uma alternativa interessante, buscando melhorar a qualidade deste tipo de obra. Para contribuir neste âmbito, o principal objetivo desta pesquisa é analisar em laboratório o comportamento mecânico de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição (RCD) e de *reclaimed asphalt pavement* (RAP), visando a sua aplicação como material de preenchimento em reaterro de valas. O RCD foi avaliado com adição de cimento e o RAP na forma de mistura reciclada a frio com espuma de asfalto. Para isso, foi analisado o comportamento físico e mecânico destes dois tipos de agregados reciclados, sendo este último por meio de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente em equipamentos de ensaio de carga repetida, além uma análise das evoluções de deformação permanente segundo a teoria do *Shakedown*. Os resultados mostram, de maneira geral, que o RCD estabilizado com cimento e o RAP são propícios para a aplicação como material de preenchimento de valas. Além disso, os agregados reciclados estudados nesta pesquisa podem melhorar a qualidade do serviço de preenchimento de valas, tendo uma destinação melhor que os aterros sanitários.

Palavras chave: agregados reciclados, dutos enterrados, rigidez, deformação permanente, pavimento

ABSTRACT

Generation, recycling and application of recycled aggregates have been increasingly consolidated internationally. Brazil has advanced in recycling these materials, however its use is not going with the same relevance. Paving activities absorb most of these materials when using base and sub-base layers, as it does not require many advanced recycling processes for its application. The use in filling pavements ditches in is an interesting alternative, looking forward to improving the quality of this type of work. To contribute in this area, the main objective of this research is to analyze in the laboratory the mechanical behavior of recycled aggregate of construction and demolition waste (CDW) and of reclaimed asphalt pavement (RAP), aiming their application in backfilling of trenches. CDW was evaluated with addition of cement and RAP as cold recycled mixture with foam asphalt. For this, physical and mechanical behavior of these two types of recycled aggregates were analyzed, being the latter through resilient modulus and permanent deformation tests in repeated load test equipment, as well as an analysis of the evolution of permanent deformation according to *Shakedown* theory. The results show that, in general, RCD stabilized with cement and RAP are suitable for application as trench backfill. Besides, recycled aggregates studied in this research can improve the quality of the ditch filling service, having a better destination than landfills.

Keywords: recycled aggregates, buried pipes, stiffness, permanent deformation, pavement

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16

1. 1 OBJETIVO 18

1. 2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 18

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

2.1 REATERRO DE VALAS EM VIAS URBANAS 20

2.2 MATERIAIS DE PREENCHIMENTO 25

2.2.1 Materiais Granulares 26

2.2.2 Materiais Granulares Estabilizados 27

2.2.3 *Flowable Fill* 28

2.3 RECOMENDAÇÕES E NORMATIVAS SOBRE REATERRO DE VALAS EM VIAS URBANAS 28

2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS AGREGADOS RECICLADOS . 37

2.4.1 Módulo de resiliência 38

2.4.2 Deformação Permanente 41

2.5 TEMPO DE CURA DE MATERIAIS ESTABILIZADOS 48

3.PROGRAMA EXPERIMENTAL 52

3.1 MATERIAIS 53

3.2 MÉTODOS 55

3.2.1 Caracterização física dos agregados reciclados 55

3.2.1.1 Granulometria 55

3.2.1.2 Forma dos agregados 55

3.2.1.3 Resistência mecânica dos agregados graúdos 56

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles 56

3.2.1.5 Absorção e densidade aparente do agregado graúdo 57

3.2.1.6 Compactação 57

3.2.2.1 Módulo de resiliência 61
3.2.2.2 Deformação permanente 62
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 63
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS RECICLADOS 63
4.1.1 Granulometria 63
4.1.2 Forma dos grãos 66
4.1.3 Resistência mecânica dos agregados graúdos 67
4.1.4 Abrasão Los Angeles 69
4.1.5 Absorção do agregado graúdo 71
4.1.6 Compactação 72
4.1.7 Análise de degradação dos agregados 73
4.1.8 Dosagem do teor de ligante da mistura RAP 74
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS AGREGADOS RECICLADOS .. 76
4.2.1 Módulo de resiliência 76
4.2.2 Deformação permanente 81
4.2.2.1 Teoria do *Shakedown* 89
4.3 PROPOSTAS DE SEÇÕES-TIPO PARA REATERRO DE VALAS 92
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS 94
5.1 CONCLUSÕES 94
5.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS 97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de intervenções em pavimentos urbanos pelas concessionárias de saneamento básico e por companhias que utilizam redes subterrâneas para fornecimento de serviços (gás, energia, telefonia, fibra ótica, dentre outras), requer escavações em forma de trincheiras para reparar ou reinstalar novas tubulações e, posteriormente, aterrá-las.

As dificuldades encontradas no reaterro de valas são referentes ao alívio de tensões do solo durante sua abertura, esgotamento d'água, espaço estreito de execução da compactação e compactação imprópria do material de preenchimento (BOTELHO, 1998; GHATAORA *et al.*, 2006; GODOY E VASCONCELLOS, 2013; LE e*t al.*, 2017). Essas acarretam defeitos no pavimento, como falhas nas bordas de maneira adjacente ao corte da vala, buracos decorrentes a desagregação de agregados da camada de revestimento, recalque no pavimento devido a acomodações plásticas dos materiais, e maior percolação de água nos materiais constituintes da vala, além de riscos de acidentes e redução operacional da via.

As adversidades mais recorrentes neste tipo de serviço (em que geralmente é utilizado o próprio material escavado) estão relacionadas à compactação dos materiais de preenchimento, excesso de umidade na trincheira, natureza mineralógica dos solos reutilizados e, no caso do município de São Paulo, os solos serem frequentemente de baixa capacidade de suporte e expansivos. Como uma solução pode ser citada a utilização de materiais alternativos, como por exemplo, agregados reciclados, visando adequação da capacidade de suporte para esta finalidade.

Segundo o *ranking* de serviços de 2018 em obras de reaterro de valas em pavimentos urbanos, as companhias de águas, gás, eletricidade e de trânsito da cidade de São Paulo (SABESP, COMGÁS, ELETROPAULO e CET) foram notificadas várias vezes pela prefeitura municipal por apresentarem serviços com defeitos ou inacabadas. Em particular a SABESP, no ano de 2017, realizou

614.505 reposições de valas na região metropolitana de São Paulo. No *ranking* de reclamações dos consumidores, a reposição de valas configura a oitava posição, o que representa cerca de 4% das reclamações. Outro dado importante no ano de 2017 é o índice de recorreção da reposição de valas, que representou 5,3% dos serviços efetuados, o que totalizou 9.451 serviços refeitos naquele ano (SABESP, 2018).

O controle tecnológico de execução do serviço de reaterro de valas é um fator importante para a vida útil de um pavimento de via urbana, sendo que a maioria dos serviços estão fora dos limites propostos por normativas (FORTES *et al.,* 2005; DARONCHO E LOPES, 2007; ANDRADE, 2016).

Diferentes tipos de materiais têm sido estudados e aplicados como preenchimento em reaterro de valas. Dentre eles pode-se citar os granulares (CARRERA *et al.,* 2010), cinzas de carvão (LE e*t al.*, 2017), *Controlled Low-Strength Materials*[1] – CLSMs (BERTOLA *et al.*, 2013; LEE *et al.*, 2014; WEIDLICH e GRAJCAR, 2017; LING *et al.*, 2018) e pneu triturado (TERZI *et al.*, 2015). No Brasil, o material de preenchimento mais utilizado é o próprio solo escavado, entretanto há normativas vigentes no estado de São Paulo que já possibilitam a utilização de outros materiais para o reaterro de valas, como a brita graduada simples (BGS), agregado reciclado de resíduo de construção e demolição (RCD), agregado reciclado de *reclaimed asphalt pavement* (RAP) e concreto magro, sendo que a utilização de cada material é função do tráfego local (SABESP, 2014; PMSP, 2018). Ou seja, embora já haja tais alternativas de materiais e especificações, o uso de solo escavado local ainda é a prática mais comum, como visto nos trabalhos analisados no decorrer do referencial teórico desta pesquisa.

O emprego de materiais alternativos como agregados reciclados, seja de resíduo de construção, seja de pavimentação asfáltica, por exemplo, pode ser interessante do ponto de vista ambiental, considerando aspectos já reportados

[1] CLSMs são materiais de construção fluidos e auto adensáveis que são utilizados em uma variedade de aplicações na engenharia civil.

por diversos autores (TAM, 2009; BLENGINI E GARBARINO, 2010), especialmente quanto à destinação e reaproveitamento de resíduos ou de redução da extração de novos materiais, além de melhorar a vida útil das valas, estes materiais aumentam o desempenho mecânico das mesmas.

O presente trabalho apresenta um estudo laboratorial de agregados reciclados de RCD e de RAP combinado com espuma de asfalto, do ponto de vista de comportamento mecânico (módulo de resiliência e deformação permanente), considerando a aplicação como material de preenchimento de pavimentos em reparos por abertura de valas. Este estudo busca contribuir para um maior entendimento do comportamento destes materiais em tal utilização, fomentando o seu emprego. Embora tais agregados reciclados já sejam amplamente usados em pavimentação contínua, há que se considerar que a configuração física do pavimento neste tipo de situação é diferente de reparo de vala. Estas diferenças se encontram: (i) no comportamento da interação solo-estrutura (tubulação), com os fenômenos de arqueamentos, que acarretam outro tipo de distribuição de tensões pelo pavimento, (ii) os esforços de empuxos exercidos pelas paredes laterais da vala e (iii) a sobrecarga que a vala é submetida.

1. 1 OBJETIVO

O principal objetivo desta pesquisa é analisar em laboratório o comportamento mecânico de agregados reciclados de RCD com e sem cimento e de agregados reciclados de RAP combinados a espuma de asfalto, visando a sua aplicação como material de preenchimento em reaterro de valas. Com base nos resultados, são adicionalmente propostas estruturas de seções-tipo de pavimentos de vias urbanas empregando estes materiais.

1. 2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos e referências bibliográficas, conforme a seguir:

O Capítulo 1 refere se a Introdução, que apresenta uma visão geral sobre a problemática do reaterro de valas em vias urbanas, apontando como um dos principais problemas o material de preenchimento e o controle tecnológico frente a compactação dos materiais, além do objetivo da pesquisa que norteou o andamento da pesquisa.

O Capítulo 2 refere se a Revisão Bibliográfica, que descreve sobre o processo de reaterro de valas, normativos e tipos de materiais de preenchimento, aspectos gerais de resíduos de construção e demolição e de misturas com alto teor de *reclaimed asphalt pavement* e considerações acerca do comportamento mecânico de materiais granulares.

O Capítulo 3 descreve o Programa Experimental, que são contemplados os materiais, coleta dos agregados reciclados e procedimentos de caracterização dos resíduos de construção e demolição e de misturas com *reclaimed asphalt pavement.*

O Capítulo 4 aborda a Apresentação e Análise dos Resultados dos ensaios de caracterização realizados em laboratório. A primeira parte refere se a caracterização física de ambos os agregados reciclados e a segunda sobre o comportamento mecânico frente ao módulo de resiliência e a deformação permanente. Este último ainda é feito uma análise acerca da teoria do *Shakedown*.

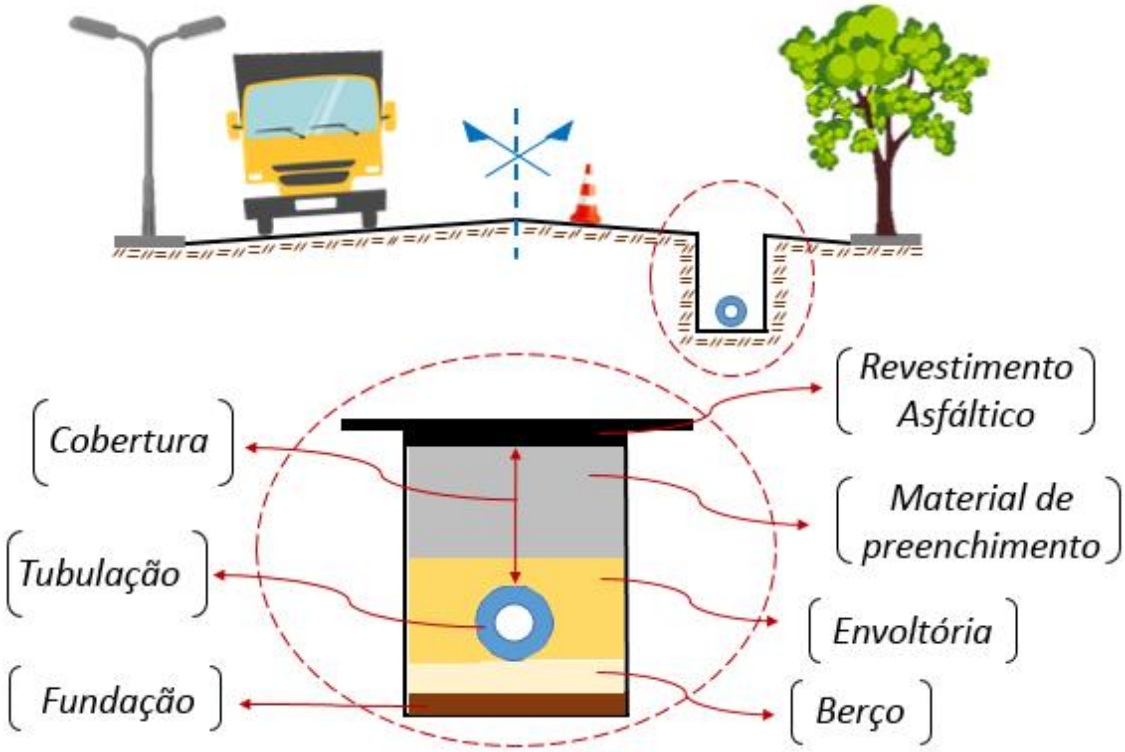
O Capítulo 5 relata as conclusões da presente pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REATERRO DE VALAS EM VIAS URBANAS

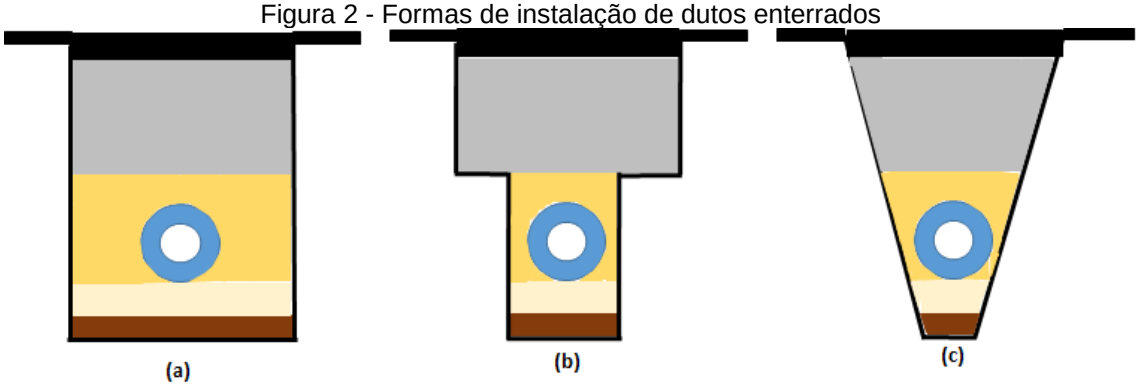
Segundo Howard (1996), as camadas que compõem a restauração de valas com tubulações, após a sua abertura, podem ser divididas em cinco (Figura 1). A fundação, que consiste na camada de regularização do fundo da vala, a qual pode ser removida no caso do material escavado ser inadequado para reutilização, sendo substituído por outro. O berço, disposto abaixo da tubulação, serve de camada de assentamento desta. Há ainda a envoltória, cujo material tem a finalidade de suportar o carregamento no tubo. Neste caso, para tubos rígidos, a envoltória auxilia na distribuição das cargas sobre a fundação, enquanto em tubos flexíveis a função é de resistir à deflexão da tubulação devido ao carregamento aplicado. O material de preenchimento equivale ao usado como reaterro da vala, após a instalação da tubulação e da envoltória do tubo, sendo que esse pode suprir a ausência da envoltória, neste caso constituindo uma camada única de material. Nesta parte da estrutura, dá-se o nome de recobrimento ou cobertura à profundidade do reaterro, a partir do topo do tubo até o nível do pavimento. Ao final, para completar a estrutura, geralmente é colocada uma camada de revestimento asfáltico.

Figura 1 - Estrutura básica de valas



Os dutos enterrados são divididos em duas categorias, quanto ao método de instalação, podendo ser intitulados “em vala” ou salientes (BUENO E COSTA, 2012; GODOY E VASCONCELLOS, 2013). Os dutos em vala são concebidos por meio da escavação de uma trincheira no terreno, no qual o passo a passo construtivo consiste no corte e aterro. Esses podem ser classificados em valas estreitas ou largas, com paredes escalonadas ou inclinadas (Figura 2), já os dutos salientes são instalados sob aterros, logo não serão considerados no escopo desta pesquisa.

Figura 2 - Formas de instalação de dutos enterrados



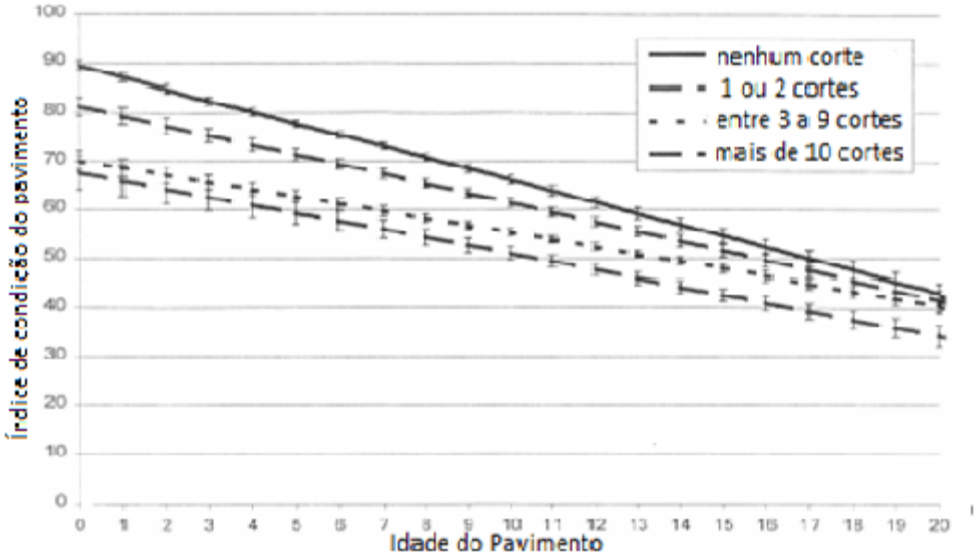
(a) Vala estreita ou larga; (b) com parede escalonada; (c) com paredes inclinadas

Existem também métodos não destrutivos que eliminam a execução de valas (*trenchless pipes*, do inglês), acarretando redução de perturbações no meio físico externo, ou seja, sem a interrupção do tráfego de veículos ou pessoas. Estes métodos estão em estudo na SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), sendo conhecido no meio técnico como “tatuzinho”.

As fases da interferência na infraestrutura urbana podem ser consideradas as seguintes: (i) sinalização, (ii) remoção do pavimento, (iii) abertura das valas; (iv) esgotamento d’água, (v) escoramento, (vi) instalações e/ou reparos nos dutos enterrados, (vii) reaterro de valas e (viii) reposição do pavimento (BOTELHO, 1998; STUCHI, 2005; SABESP, 2016, ANDRADE, 2016). As etapas de reaterro de valas e reposição de pavimento são apontadas como as mais problemáticas, visto que muitas vezes apresentam má qualidade nos serviços executados ou utilização de materiais impróprios.

A abertura de trincheiras reflete diretamente no desempenho do pavimento, e a magnitude deste efeito depende dos procedimentos de reparação do pavimento, condição do material de preenchimento, clima, tráfego e condição do pavimento anterior ao reparo (ARUDI *et al.,* 2000; SCHAEFER *et al.,* 2005). Estudos feitos na cidade de Seattle, nos Estados Unidos, correlacionam o efeito da abertura de valas com o desempenho do pavimento. Esse baseou em dois parâmetros: (i) o *pavement condition index* (PCI) de cada pavimento, bem como informações sobre a idade do pavimento e tipo de superfície, e (ii) o número de serviços de corte presente em cada seção. A combinação dos dados mostrou que as pontuações são mais baixas para pavimentos de mesma idade e tipo, aliado com a abertura de valas (SEATTLE TRANSPORTATION, 2000), portanto apresentam uma melhor condição (Figura 3). O estudo tem contribuições satisfatórias, entretanto só essa correlação não pode garantir a real situação estrutural do pavimento, no que tange as camadas inferiores a camada de rolamento. Por isso a importância de se analisar a estrutura do pavimento como um todo.

Figura 3 - Efeito de reparos de cortes na condição do pavimento



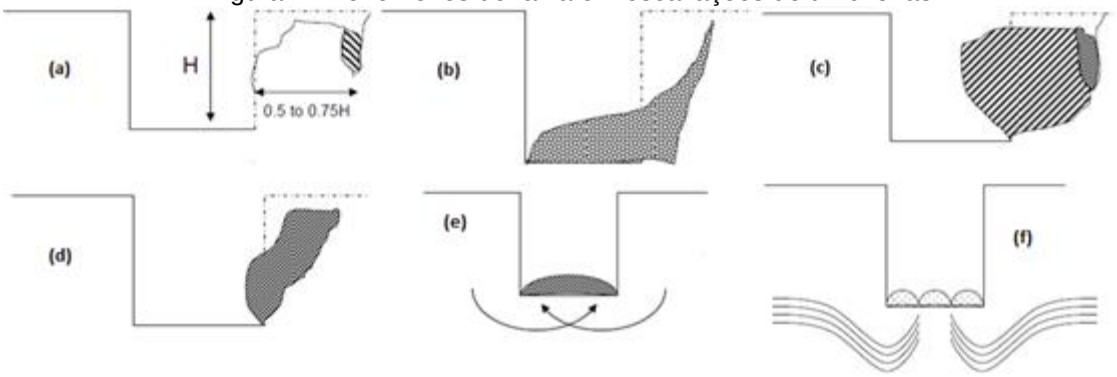
Fonte: Adaptado de Seattle Transportation, 2000

Segundo Stuchi (2005), existe uma carência de sistemas de gerenciamento de infraestruturas públicas, neste caso entre o setor privado e público que utiliza de forma independente o espaço físico da malha viária, e de um controle tecnológico das intervenções que seja mais rigoroso. Esta melhora nos sistemas de gerência pode ser facilitada por meio da utilização de Sistema de Informações Geográfica (SIG), como o programa AcquaGIS que foi desenvolvido para atender as demandas das empresas de saneamento básico.

Os serviços públicos, como gás, saneamento básico e telecomunicação, demandam constantemente da abertura de valas para a instalação e manutenção dos tubos ou redes. As principais causas de falhas na recomposição das valas são quanto a: (i) métodos de construção, que englobam técnicas de escavação e assentamento do material de preenchimento, (ii) materiais de preenchimento com baixa resistência, que com a reutilização de materiais escavados saturados, afetando a compactação e resultando em expansão ou retração do reaterro, e (iii) escolha do local da vala, que depende de tipo de material, condições de umidade e se o local está fora da canalização do tráfego (FORTES *et al.*, 2005; SCHAEFER *et al.,* 2005; WIDGER e ZABOLOTNII, 2013; ANDRADE, 2016).

No decorrer da escavação deve ser ponderado o efeito da zona de influência, uma vez que essa desempenha um papel crítico na deterioração do pavimento em torno das paredes da vala, devido ao alívio de tensões das camadas constituintes (ARUDI *et al.,* 2000; BUENO E COSTA, 2012). De acordo com OSHA (2014), a instabilidade do solo no decorrer da abertura da trincheira promove alguns fenômenos frequentes, como a ruptura por tensão, escorregamento, tombamento, abatimento ou abaulamento, *heaving* ou *squeezing* e *boiling*, (Figura 4).

Figura 4 - Fenômenos de falha em escavações de trincheiras



(a) ruptura por tensão (b) escorregamento (c) tombamento (d) abatimento ou abaulamento (e) *heaving* ou *squeezing* (f) *boiling*
Fonte: OSHA, 2014

A redistribuição de tensões no solo após a instalação de dutos enterrados é fruto da interação entre o solo circundante e da estrutura, visto que para um bom dimensionamento as cargas móveis (tráfego), peso próprio do maciço de solo (tipo de solo, profundidade do tubo, empuxo e compactação) e a tubulação (tipo de tubo, tipo de instalação, rigidez do material) devem ser consideradas para minimizar os efeitos de arqueamento e deflexões (BUENO ECOSTA, 2012; IZIDORO, 2017).

No que tange às adversidades frequentes com o material de preenchimento das valas, pode se citar: (i) recalque inicial, (ii) recalque a longo prazo, decorrente do carregamento do tráfego, colapso ou compactação não uniforme dos materiais ou recalque diferencial do solo da trincheira e do entorno, (iii) condições de

umidade e congelamento, devido a presença de finos, permeabilidade dos materiais ou fenômeno de retração ou expansão dos materiais (GELB, 2002; WIDGER e ZABOLOTNII, 2013).

Após acompanhar 50 intervenções de abertura de valas na cidade de São Paulo, Andrade (2016) propôs ações preventivas para evitar possíveis defeitos no processo de recomposição dos pavimentos urbanos (Tabela 1).

Tabela 1 - Ações preventivas para evitar possíveis defeitos em recomposições de pavimentos

Fase do serviço	**Ação preventiva**	**Ajuste recomendado**
Abertura da vala	Corte da capa de rolamento com equipamento adequado	Emprego de Serra Clipper
Recomposição de sub-base e base	Emprego de solo isento de contaminação e com umidade aceitável	Ajuste do teor de umidade dentro da faixa de mais ou menos 2% da umidade ótima
	Compactação realizada em camadas de 20 cm	Uso de compactadores pneumáticos ou percussão
Recomposição de capa de rolamento	Atenção para a aplicação de imprimação	Aplicação de emulsões asfálticas de ruptura rápida a uma taxa de 0,4 a 0,6 l/m²
	Atenção com a temperatura do CBUQ	Compactador do tipo placa vibratória ou rolo

Fonte:Adapatado Andrade, 2016

2.2 MATERIAIS DE PREENCHIMENTO

Os materiais de preenchimento de valas podem ser classificados em três categorias distintas: (i) materiais granulares, (ii) materiais granulares estabilizados e (iii) *flowable fill* (mistura básica de material cimentício, água e solo ou areia reciclada, além de aditivos quando forem necessários) (HOWARD e HITCH, 1998; WIDGER e ZABOLOTNII, 2013).

2.2.1 Materiais Granulares

Esta categoria de materiais subdivide-se em materiais escavados (solos) e materiais granulares. Para este tipo material, deve se ter precauções quanto à compactação e teor de umidade, devido à presença de finos (WIDGER e ZABOLOTNII, 2013).

Para os solos escavados da abertura das valas, a plasticidade se torna uma propriedade crucial para a utilização desse como material de preenchimento. A plasticidade dos materiais está relacionada à absorção de água que envolve as partículas argilominerais que compõem a fração fina dos solos. A porcentagem de finos aumenta a capilaridade, acarretando a diminuição da tensão e aumentando a deformação do material, o que pode impactar seu desempenho mecânico (DAS e SOBHAN, 2014). Portanto, para o emprego de materiais escavados é essencial a condição de “trincheira seca”, visto que essa proporciona maior estabilidade, devido à ausência de água (SUDAS, 2011).

Em contrapartida, os materiais granulares possuem maior resistência, além de conseguirem manter essa em uma ampla faixa de teores de umidade, especialmente quando confinados, em comparação aos solos escavados. A resistência destes materiais é função de sua granulometria e do intertravamento entre as partículas. Estes materiais são aplicados como preenchimento ou berço, visto que sua compactação apresenta um desempenho satisfatório quando comparados com solos escavados (GARCEZ, 2010; ANDRADE, 2016).

Com a mesma finalidade dos materiais granulares, o *reclaimed asphalt concrete* (RAP), que contém betume, tende a atribuir ao material de preenchimento certa coesão e durabilidade, permanecendo permeável. Uma vantagem de sua aplicação é que o mesmo material do revestimento acima do material de preenchimento pode ser utilizado para recomposição do pavimento e sua execução independe das condições climáticas (WIDGER *et al.,* 2012). Segundo Tysl e Noll (2011) este material deve ser evitado particularmente como material

de preenchimento em valas onde a tubulação é flexível, devido ao seu potencial de compressão sob carregamento do tráfego. O que justifica isso é a deformação inicial que esse material apresenta durante seus primeiros sete dias, que em contra partida ganha resistência mecânica.

O agregado reciclado de concreto (ARC) equivale aos RCDs beneficiados e pode ser utilizado como material de preenchimento e também como *flowable fill,* com tamanhos inferiores a $^{3}/_{4}$ polegada ou ainda 100% triturado, originando um material de preenchimento (LIM *et al.,* 2001). Tysl e Noll (2011) recomendam esta categoria de material como preenchimento, ponderando que deve ser feita a triagem do material para a retirada de materiais orgânicos, cerâmicos e metálicos.

Nesta categoria, os solos superficiais, congelados, contaminados ou com matéria orgânica, além de resíduos sólidos ou rochas com diâmetro superior a 15 cm são considerados inadequados para o preenchimento de valas (WIDGER e ZABOLOTNII*,* 2013; ASTM, 2012).

2.2.2 Materiais Granulares Estabilizados

Este grupo de materiais se subdivide em misturas estabilizadas com betume (BSMs) e estabilizadas hidraulicamente (do inglês, *hydraulically bound mixes* – HBMs). Esta categoria de material tem benefícios quanto à sua utilização, visto que melhora o desempenho mecânico dos materiais, mas, por outro lado, requer cautela quanto à compactação.

Os BSMs proporcionam ao material estabilizado um melhor desempenho mecânico, aumentando a resistência à compressão e cisalhamento, bem como a resistência à água (WIRTGEN, 2012). Esses apresentam o mesmo propósito das misturas de RAP, coesão e durabilidade. Neste tipo de material a adição de percentuais pequenos (2%, 3% e 4%) de cimento Portland, cal hidratada ou rejuvenescedores podem melhorar ainda mais as suas propriedades mecânicas.

Os HBMs são materiais estabilizados com cimento Portland, cal hidratada, cinzas volantes ou escória. Esta categoria de estabilização engloba reações de hidratação, que durante a ligação da água com o cimento originam cristais que envolvem todo o agregado, resultando na formação de agentes cimentantes que aumentam a resistência, rigidez e a durabilidade da mistura (WRAP, 2007).

2.2.3 *Flowable Fill*

Esta classe de materiais apresenta duas subdivisões, a dos *Controlled Low-Strength Materials* (CLSMs) e espuma de concreto. Estes materiais são autoadensáveis, o que se torna um ponto positivo para aplicação e vida útil da tubulação, visto que não haverá esforços mecânicos (proveniente de equipamentos mecânicos) que possa danificar o tubo, entretanto o custo inicial é elevado.

Os CLSMs distribuem o carregamento do tráfego uniformemente sobre a tubulação, reduzindo o risco de quebra desta última, além de conterem um alto módulo de elasticidade (rigidez) (ZHAN e RAJANI, 1997; LEE e*t al.*, 2014). Em contrapartida, ao se inserir este material no interior da vala no processo executivo, a tubulação pode flutuar e se deslocar em relação à locação desejada (SUDAS, 2011; TYSL e NOLL, 2011; LING *et al.*, 2018).

A espuma de concreto, também conhecida como concreto leve, consiste na incorporação de ar ao concreto. Esse material apresenta um ganho de resistência inicial significativo, entre 12 a 18 h após sua aplicação, além de ser considerado de fácil escavação, tendo em vista seus vazios presentes (WRAP*,* 2007). As demais características seguem iguais ao dos CLSMs.

2.3 RECOMENDAÇÕES E NORMATIVAS SOBRE REATERRO DE VALAS EM VIAS URBANAS

Rahman *et al.* (2014), com base em especificações da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), *American Society for*

Testing and Materials (ASTM) e *American Water Works Association* (AWWA), propuseram uma comparação entre as especificações de materiais de preenchimento de valas e materiais para camadas de sub-base de pavimentos. Como os materiais utilizados nesta pesquisa eram tijolos triturados, agregados reciclados de concreto e RAP, todos apresentavam granulometrias grossas e finas, que são adequados para aplicação de preenchimento de valas (frente as normas supracitadas), entretanto as especificações para valas foram ligeiramente diferentes quando comparadas para camadas de sub-base (Tabela 2)

Tabela 2 - Requisitos típicos para aplicações de material de preenchimento de tubos e para sub-base de pavimentos

		Agregado Britado	**Solo grosso (pouco ou nenhum fino)**	**Solo grosso com finos**	**Solo fino (baixa plasticidade)**	**Solo fino (alta plasticidade)**	**Silte, argilas, turfa orgânica**	**Camada de Sub-base**
Classificação USCS		GW, GP	GW, GP, SW, SP	GM, GC, SM, SC	ML, CL	MH, CH	OL, OH, PT	GW/SW
AASHTO		-	A1, A3	A2, A4, A6	A2, A4, A6	A5, A7	A5, A7	A-1-a
ASTM		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V	Classe V	-
AWWA design Manuals	M9 (1)	-	Categoria I	Categoria II	Categoria III	Categoria III	-	-
	M11 (2)	-	GW, GP, SW, SP	GM, GC, SM, SC	ML, CL	MH, CH	OL, OH, PT	-
	M23 (3)	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC5	-
Graduação (% teor de finos)	< 37,5 mm	100	100	100	100	100	100	100
	4,75 mm	< 10	< 50	< 50	> 50	> 50	> 50	> 42
	0,075 mm	< 5	< 5	12 -40	> 50	> 50	> 50	> 6
Densidade máxima seca (mg/m³) (4)		2,2	2,0 1,9		1,8	1,8	-	1,9

(1)Tubulação de concreto; (2) Tubulação de ferro; (3) Tubulação de PVC; (4) Compactação superior a 95%

Fonte: Adaptado Rahman *et al.,* (2014)

De acordo com as normas D 2774 (ASTM, 2012) e D 2321 (ASTM, 2018), os agregados reciclados de concreto podem ser utilizados como materiais de preenchimento e envoltória nas valas, sendo classificados como sendo Classe II, que engloba materiais de granulometria grossa (GW, GP, SW, SP), podendo conter até 12% de finos. Esta classe equivale a solos das categorias A1 e A3 da AASHTO (ASTM, 2018). Agregados, detritos ou torrões congelados maiores que 3 polegadas (76 mm de diâmetro) devem ser removidos.

O documento *Specification for Highway Works* (SHW, 2016) classifica os RCA a serem aplicados em preenchimento de valas em três tipos: Tipo I, II e III (*Open Graded*), bem como apresenta especificações relativas à granulometria (Tabela 3), materiais passantes na peneira 0,425 mm e porcentagens de materiais indesejáveis (metal, madeira e asfáltico). Quanto aos materiais passantes na peneira 0,425 mm, estes devem ser classificados como não plásticos para os tipos I e III e ter índice de plasticidade inferior a 6% para o tipo II. A porcentagem de materiais indesejáveis deve ser inferior a 1% para metais e madeiras e 5% para materiais asfálticos, para todos os tipos.

Tabela 3 - Granulometria dos materiais granulares do Tipos I, II e III

Aberturas (mm)	**Tipo I**	**Tipo II**	**Tipo III**
80	-	-	100
63	100	100	-
40	-	-	80 – 99
31,5	75 – 99	75 – 99	-
20	-	-	50 – 78
16	43 – 81	50 – 90	-
10	-	-	31 – 60
8	23 – 66	30 – 75	-
4	12 – 53	15 – 60	18 – 46
2	6 – 42	-	10 – 35
1	3 – 32	0 – 35	6 – 26
0,500	-	-	0 – 20
0,063	0 – 9	0 – 9	0 – 5

Fonte: SHW, 2016

A *Melbourne Retail Water Agencies* (MRWA) permite a utilização de agregados reciclados como material de preenchimento de reaterro de valas, especificando a granulometria do material (Tabela 4) e o grau de compactação de 95%, para camadas entre 100 mm e 300 mm de profundidade (MRWA, 2013).

Tabela 4 - Limites de granulometria MRWA

Abertura (mm)	Porcentagem passante **20 mm Class CC4**
26,5	100
19,0	-
9,5	-
4,75	42 – 76
0,425	10 – 28
0,075	2 – 14

Fonte: Adaptado VIC Roads Standard 820, 2011

Quanto ao uso de agregado reciclado de RCD como material de preenchimento em reaterro de valas, existe ainda uma resistência quanto ao seu uso, embora este material já tenha sido estudado por alguns autores para esta finalidade (Tabela 5). Verifica-se que estes estudos têm se concentrado na região sudeste do Brasil, uma vez que é onde se localiza a maior produção de resíduos de construção e demolição (VEDRONI, 2007; ANDRADE, 2016; IZIDORO, 2017).

Tabela 5 - Trabalhos com aplicação de agregado reciclado de RCD em reaterro de valas

Autor/Ano	Camada de Aplicação	Tráfego	Observações
Vedroni (2007)	Material de preenchimento e envoltória	Baixo e Médio	O RCD com a finalidade de material de preenchimento foi estabilizado com 6% de cimento Portland e foi produzida uma areia reciclada de RCD para a envoltória; Teve bom desempenho.
Garcez (2010)	Material de preenchimento	Médio (1)	Após 10 meses da abertura do tráfego não houve deflexões ou existência de trincas.
Andrade (2016)	Material de preenchimento	Baixo e Médio	Após 19 meses da abertura do tráfego, o eixo da vala estava no nível do greide do pavimento; falta de conformidade da junta com o greide e apresentando um afundamento de 1,5 cm junto às bordas da vala; fissuras no revestimento, junto ao alinhamento da borda.
Izidoro (2017)	Envoltória	Médio	Teve bom desempenho.

(1) durante a pesquisa se observou a presença de desvios de caminhões pela via, passando a considerar o tráfego meio pesado.

A Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) publicou em 2018 uma instrução de execução para aplicação de agregado reciclado como material de preenchimento de valas e/ou envoltórias, sendo que o requisito preconizado é ter CBR ≥ 20%, tendo sido compactado a 100% do Proctor normal. A espessura é variável, dependendo do tráfego (Tabela 6) (PMSP, 2018).

Tabela 6 - Seções tipo para reposição do pavimento danificado por abertura de valas

Seções Tipo	**Tipo 1**	**Tipo 2**	**Tipo 3**	**Tipo 4**	**Tipo 5**	**Tipo 6**	**Tipo 7**	**Tipo 8**	**Tipo 9**
Camadas	**Tráfego Leve**			**Tráfego Médio**			**Tráfego Pesado**		
Concreto asfáltico usinado a quente ou morno	4 cm	3,5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm (³)	5 cm (³)	5 cm (³)
Imprimação betuminosa ligante	Aplicável	Aplicável	Não Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável
***Binder* ou *binder* morno**	4 cm	Não Aplicável	Não Aplicável	7 cm	Não Aplicável	5 cm	7 cm (*)	Não Aplicável	5 cm (*)
Base de material fresado reciclado com espuma de asfalto	Não Aplicável	10 cm	Não Aplicável	Não Aplicável	10 cm	Não Aplicável	Não Aplicável	10 cm	Não Aplicável
Imprimação betuminosa impermeabilizante	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Aplicável
Brita graduada simples	10 cm	10 cm	15 cm	12 cm	12 cm	Não Aplicável	12 cm	12 cm	Não Aplicável
Base de concreto (¹)	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável	10 cm	Não Aplicável	Não Aplicável	10 cm
Reforço do subleito de solo selecionado ou agregado reciclado ou BGS (²)	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável

(¹) fck ≥ 15 MPa e abatimento ≤ 5 cm; (²) CBR ≥ 12% e GC igual a 100% do Proctor Normal; (³) Asfalto modificado por polímero ou borracha de pneu; (*) Executado em duas camadas.

A PMSP (2018) ainda faz uma observação sobre vias de tráfego muito pesado: se for necessária a abertura de valas em local com esta condição, deverá ser estudada uma solução específica, a qual deve ser submetida à aprovação da fiscalização.

Já a SABESP apresenta soluções de estruturas para a reposição do pavimento após a abertura de vala (Tabela 7 a 10), que são função do tipo de tráfego. Cabe somente comentar que, além das soluções apresentadas a seguir, esta norma técnica também contém estruturas com revestimentos com paralelepípedos (SABESP, 2016).

Tabela 7 - Estrutura com solo coesivo e BGS

Dimensões	**Tipo de tráfego**				
	Leve	**Médio**	**Meio Pesado**	**Pesado ou FO I (³)**	**Muito Pesado ou FO II (³)**
CBUQ	4 cm	5 cm	5 cm	9 cm	11 cm
BGS	32 cm	33 cm	36 cm	33 cm	31 cm
Solo	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Envoltória (¹)	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Envoltória (²)	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm

(¹) parte acima do topo da tubulação; (²) parte abaixo da base da tubulação; (³) FO: faixa exclusiva de ônibus

Tabela 8 - Estrutura com solo coesivo e concreto

Dimensões	**Tipo de tráfego**				
	Leve	**Médio**	**Meio Pesado**	**Pesado ou FO I (³)**	**Muito Pesado ou FO II (³)**
CBUQ	4 cm	4 cm	7 cm	12 cm	14 cm
Concreto	14 cm	14 cm	13 cm	10 cm	10 cm
Solo	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Envoltória (¹)	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Envoltória (²)	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm

(¹) parte acima do topo da tubulação; (²) parte abaixo da base da tubulação; (³) FO: faixa exclusiva de ônibus

Tabela 9 - Estrutura com solo não coesivo (areia) e BGS

Dimensões	Tipo de tráfego				
	Leve	**Médio**	**Meio Pesado**	**Pesado ou FO I (³)**	**Muito Pesado ou FO II (³)**
CBUQ	4 cm	5 cm	7 cm	12 cm	14 cm
BGS	23 cm	24 cm	22 cm	16 cm	15 cm
Areia	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Envoltória (¹)	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Envoltória (²)	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm

(¹) parte acima do topo da tubulação; (²) parte abaixo da base da tubulação; (³) FO: faixa exclusiva de ônibus

Tabela 10 - Estrutura com solo não coesivo (areia) e concreto

Dimensões	Tipo de tráfego				
	Leve	**Médio**	**Meio Pesado**	**Pesado ou FO I (³)**	**Muito Pesado ou FO II (³)**
CBUQ	4 cm	5 cm	7 cm	12 cm	14 cm
Concreto	14 cm	14 cm	13 cm	10 cm	10 cm
Areia	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Envoltória (¹)	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm	15 cm
Envoltória (²)	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm

(¹) parte acima do topo da tubulação; (²) parte abaixo da base da tubulação; (³) FO: faixa exclusiva de ônibus

2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Hveem (1955) consolidou o primeiro estudo sobre a importância do trincamento por fadiga causado pela deformação resiliente dos solos constituintes do pavimento, o que foi significativo para os avanços nos estudos quanto ao desempenho deste tipo de estrutura. No Brasil, os primeiros estudos iniciaram-

se em 1977, na COPPE/UFRJ, com a implantação do equipamento triaxial de cargas repetidas (MEDINA e MOTTA, 2015). Por meio deste equipamento, pode-se obter parâmetros importantes para a análise dos materiais granulares na pavimentação, como módulo de resiliência e deformação permanente.

2.4.1 Módulo de resiliência

A resiliência do material consiste na energia armazenada num corpo deformado elasticamente, pelo qual é retransmitida quando cessam as tensões geradoras das deformações, correspondendo à energia potencial de deformação (BERNUCCI *et al.,* 2006; MEDINA e MOTTA, 2015).

O módulo de resiliência pode ser obtido por meio laboratorial ou de campo, sendo o primeiro obtido por ensaio triaxial de cargas repetidas e o segundo pela retroanálise de deformações lidas por provas de cargas. Com isto, é possível determinar a relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente no corpo de prova e a correspondente deformação específica axial resiliente ou recuperável (ε_r), como definido na Equação 1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \tag{1}$$

A deformação especifica recuperável equivale à relação entre a variação da altura do corpo de prova em cada ciclo de carga (Δh_r) e a altura inicial do corpo de prova (H_o), como demonstra a Equação 2.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta h_r}{H_o} \tag{2}$$

No caso de materiais granulares, à medida que se aumenta a tensão de confinamento, o módulo de resiliência se eleva, com pequenas variações da tensão de desvio, ou seja, o módulo é dependente da magnitude da tensão de confinamento (BERNUCCI *et al.,* 2006; BALBO, 2007). Entretanto, quando se tem diminuição das tensões de confinamento e aumento das tensões desvio, o

material começa a ter deformações permanentes excessivas, acarretando colapso (LENTZ e BALADI, 1980).

Para materiais granulares estabilizados com aglomerantes hidráulicos, devido às reações de cimentação das partículas, o módulo de resiliência tende ao comportamento linear, tendo as tensões desvio e confinamento independentes (BERNUCCI *et al.,* 2006; BALBO, 2007).

Segundo Stolle e*t al.* (2009), os materiais granulares apresentam propriedades mecânicas não lineares e dependentes do tempo, nível de carregamento e de tensão, histórico de tensões, distribuição granulométrica, forma das partículas, teor de finos, umidade, tempo de cura, temperatura e densidade do material. Em estudo de Molenaar e Van Niekerk (2002), por exemplo, dentre os diversos fatores que impactaram o comportamento mecânico dos agregados reciclados de RCD, o grau de compactação (GC) foi o fator predominante na oscilação do módulo de resiliência.

A correlação entre as tensões atuantes no corpo de prova e o módulo de resiliência se dá por modelos constituintes que caracterizam o comportamento resiliente dos materiais. Diversos pesquisadores estudaram o comportamento resiliente do agregado reciclado de RCD (Tabela 12) e do agregado reciclado de RAP (Tabela 11).

Tabela 11 - Exemplos de pesquisas que abordaram ensaio triaxial para módulo de resiliência em agregado reciclado de RAP espumado

Autor/Ano	**Tipo de agregado reciclado de RCD**	**Energia de compactação**	**Modelo Utilizado**
Guatimosim (2015)	RAP espumado	Modificada	$MR = k_1 . {\sigma_3}^{k_2}$
Kuchiishi *et al.* (2019)	RAP espumado	Vibratória (tempo de 5 segundos)	$MR = k_1 . {\sigma_3}^{k_2}$

Tabela 12 - Exemplos de pesquisas que abordaram ensaio triaxial para módulo de resiliência em agregado reciclado de RCD

Autor/Ano	Tipo de agregado reciclado de RCD	Energia de compactação	Modelo Utilizado
Fernandes (2004)	Concreto e misto	Intermediária e Modificada	$MR = k_1.\sigma_3{}^{k_2}.\sigma_d{}^{k_3}$
Motta (2005)	Misto e estabilizado com aglomerantes hidráulicos	Intermediária	$MR = k_1.\sigma_3{}^{k_2}.\sigma_d{}^{k_3}$
Leite (2007)	Misto	Intermediária e Modificada	$MR = k_1\theta^{k_2}$ $MR = k_1\sigma_3{}^{k_2}$
Goméz (2011) **Goméz (2016)**	Concreto	Intermediária e Modificada	$MR = k_1.\sigma_3{}^{k_2}.\sigma_d{}^{k_3}$ $MR = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{ocd}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$
Beja (2014)	Misto e estabilizado com aglomerantes hidráulicos	Modificada	$MR = k_1.\sigma_3{}^{k_2}.\sigma_d{}^{k_3}$
Silva (2014)	Concreto e cerâmico estabilizado com aglomerantes hidráulicos	Modificada	$MR = k_1\sigma_3{}^{k_2}$
Matuella *et al.* (2015)	Misto e estabilizado com aglomerantes hidráulicos	Intermediária	$MR = k_1\left(\frac{\theta}{p_{atm}}\right)^{k_2}$
Delongui (2016)	Misto	Intermediária (1)	$MR = k_1\sigma_3{}^{k_2}$ $MR = k_1\left(\frac{\theta}{p_{atm}}\right)^{k_2}$

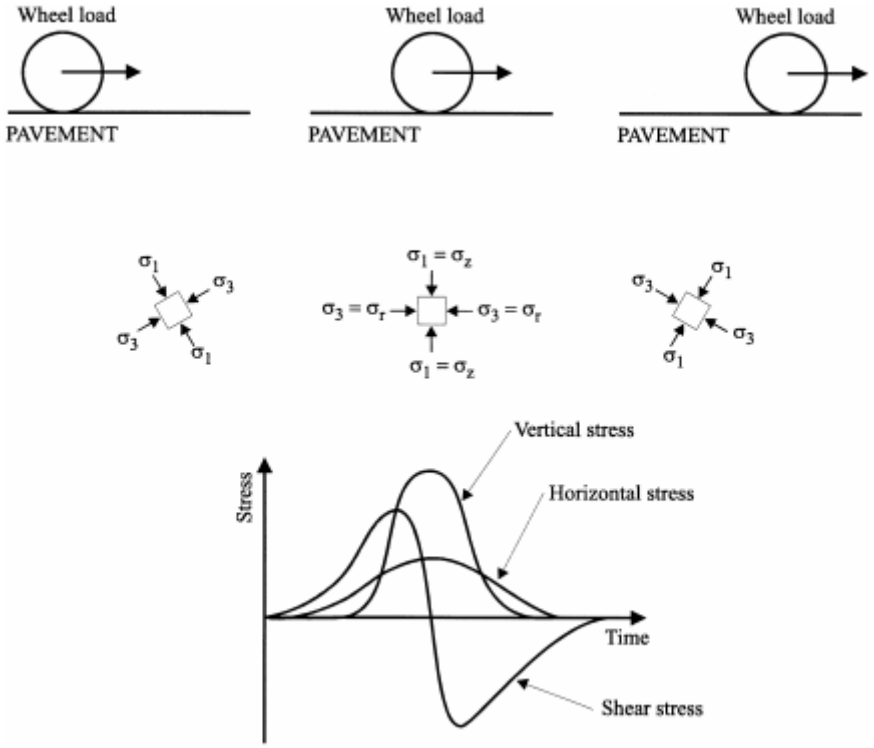
(1) Os ensaios foram executados com corpos de prova de dimensões 10 x 20 cm e 25 x 50 cm, sendo os primeiros compactados pelo método dinâmico e o segundo pelo método vibratório.

2.4.2 Deformação Permanente

Os materiais granulares são considerados um importante elemento estrutural para os pavimentos, visto que o fenômeno de afundamento ocorre nas camadas constituintes deste tipo de material, que acarreta posteriormente trincamento por fadiga nas camadas de revestimentos (LEKARP e DAWSON, 1998; WERKMEISTER *et al.,* 2001).

Após a liberação do tráfego em um pavimento novo, o mesmo é solicitado constantemente por cargas repetidas, em forma de pulso de tensão constituído de componentes de tensão vertical, horizontal e de cisalhamento (LEKARP e DAWSON, 1998; BALBO, 2007). Estas componentes são transitórias e mudam com o tempo, a Figura 5ilustra o comportamento dessas durante a passagem do carregamento.

Figura 5 - Tensões atuante no pavimento durante a passagem de uma carga de roda



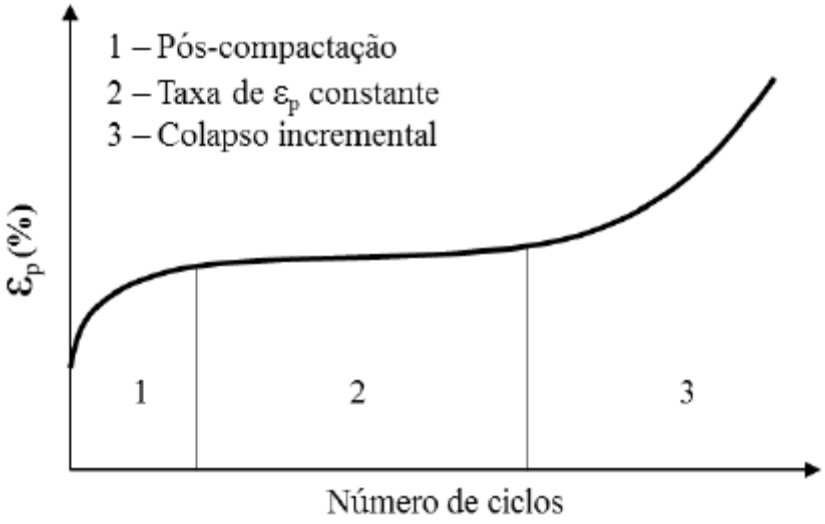
Fonte: Lekarp e Dawson, 1998

Os materiais granulares apresentam uma resposta global, quanto ao carregamento de uma carga de roda, que resulta em deformações resilientes e

permanentes. A primeira é relacionada às características de rigidez dos materiais, que preferencialmente deve ter valor alto para evitar trincamento por fadiga em camadas superiores. A segunda está relacionada ao acúmulo gradativo das deformações permanentes, que durante o ciclo de carregamento é considerado pequeno, entretanto ao longo do tempo pode acarretar o colapso da estrutura (LEKARP e DAWSON, 1998; CERNI *et al.,* 2012).

No ensaio triaxial para determinação da deformação permanente, a parte das deformações resilientes são desconsideradas da análise e é levada em conta apenas a porção das deformações permanentes acumuladas em função do número dos ciclos de carregamento. O resultado do ensaio se divide em três partes: (i) pós-compactação: onde ocorre o aumento da deformação permanente com o aumento de número de ciclos, associado às variações volumétricas no corpo de prova, (ii) taxa de deformação permanente constante: que exprime uma mudança constante na deformação acumulada, podendo estar associada a alterações volumétricas ou ao cisalhamento e (iii) colapso incremental do corpo de prova: evidencia o maior nível de deformação permanente ligado ao cisalhamento plástico sem alteração de volume (Figura 6).

Figura 6 - Resultado típico de um ensaio triaxial de deformação permanente



Fonte: Adaptado de Malysz, 2009

O comportamento dos materiais granulares frente à deformação permanente pode ser analisado pelo emprego de modelos, que podem ter abordagens

analíticas, fundamentados na teoria da plasticidade ou na teoria do *Shakedown* (PUPPALA *et al.,* 1999; WERKMEISTER, 2003; GUIMARÃES, 2009), sendo a última mais comumente utilizada para representação de materiais granulares. A Tabela 13 apresenta modelos constitutivos utilizados em pesquisas para caracterização do agregado reciclado de RCD.

Os fatores que afetam no comportamento mecânico dos materiais granulares frente à deformação permanente são: distribuição granulométrica, teor de umidade, grau de compactação, histórico de tensões, número de ciclo de carga, estado de tensões e mineralogia (LEKARP *et al.,* 2000, GUIMARÃES, 2009; LIMA e MOTTA, 2016, LIMA *et al.*, 2017).

Tabela 13 – Exemplos de pesquisas que abordam ensaio triaxial para deformação permanente em agregado reciclado de RCD

Autor/Ano	Tipo de RCD	Energia de compactação	Modelo Utilizado
Fernandes (2004)	Concreto e misto	Intermediária e Modificada	$\varepsilon_p = a\,.\,N^b$
Leite (2007)	Misto	Intermediária e Modificada	$\varepsilon_p = a\,.\,N^b$ $\varepsilon_p = a + b\,.\log N$
Beja (2014)	Misto e estabilizado com aglomerantes hidráulicos	Modificada	$\varepsilon_p = a\,.\,N^b$ $\varepsilon_p = a + b\,.\log N$
Goméz (2016)	Concreto	Intermediária e Modificada	$\frac{\varepsilon_p}{N} = A\,.\,N^{-m}$ $\varepsilon_{1,p} = \frac{A\,.\sqrt{N}}{\sqrt{N} + D}$ $\frac{\varepsilon_{1,p}(N_{ref})}{(L/p_0)} = a\,.\left(\frac{q}{p}\right)^b_{max}$ $\varepsilon_p = a\,.\,N^b$ $\varepsilon_p = (\,m\,.\,N + a).(1 - e^{-bN})$ $\varepsilon_p = A\,.\,N^B + (C\,.\,N + D)(1 - e^{-EN})$
Delongui (2016)	Misto	Intermediária (1)	$\varepsilon_p = a\,.\,N^b$ $\varepsilon_p = a + b\,.\log N$

(1) Os ensaios foram executados em estágio único e multiestágio

O conceito "*Shakedown"* é utilizado no estudo do comportamento de materiais submetidos a carregamento de carga repetida, que após um determinado número de ciclos apresentam consolidação das deformações permanentes, onde o material entre numa fase elástica que é denominada "*Shakedown".* Segundo Werkmeister *et al.* (2001), o conceito primeiramente aplicado na avaliação de recipientes sob cargas de pressão cíclica e térmica, e mais tarde foi utilizado para análise de superfícies metálicas submetidas a cargas deslizantes ou de rolamento. Por fim, Sharp e Booker (1984) empregaram o conceito para materiais granulares em pavimentos.

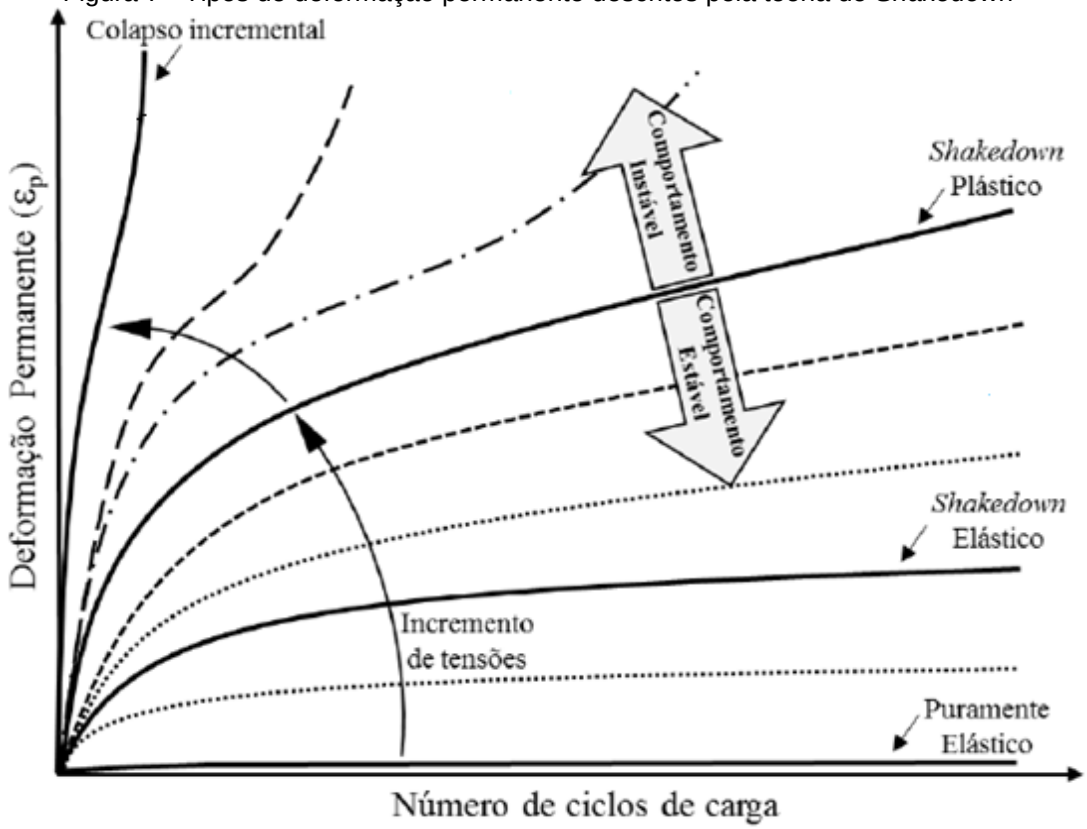
Segundo Sharp e Booker (1984) a magnitude da deformação permanente acumulada está relacionada ao nível de tensão de cisalhamento. Em baixos níveis de tensão (relação entre tensões vertical e radial), a deformação permanente atinge o equilíbrio após a compactação, concomitantemente com a consolidação volumétrica. Em altos níveis de tensão, a deformação permanente aumenta rapidamente, não se estabilizando e podendo levar ao colapso da estrutura. Do ponto de vista de projeto, este comportamento implica no nível máximo de carga associado a uma resposta resiliente, que deve ser conhecida e não deve ser excedida para a estrutura não inicie as deformações permanentes (SHARP e BOOKER, 1984).

Neste contexto existem níveis críticos de tensão entre a estabilidade e instabilidade em um pavimento. Antes de analisar os limites da teoria do *Shakedown,* deve-se conhecer as respostas dos materiais granulares frente a carregamentos repetidos, esses divididos em quatro respostas (Figura 7) (WERKMEISTER *et al.,* 2001):

- Puramente elástico (Estágio 0): a aplicação de carga repetida é suficientemente pequena, acarretando apenas respostas resilientes;
- *Shakedown* elástico (Estágio 1): a aplicação de carga repetida é ligeiramente menor do que o necessário para produzir o *Shakedown* plástico. A resposta do material é plástica para um número finito de aplicação de carga, no entanto a resposta final é puramente elástica;

- *Shakedown* plástico (Estágio 2): a aplicação de carga repetida é ligeiramente menor do que o necessário para produzir o colapso incremental (Estágio 3, descrito a seguir). A resposta do material é estável, ou seja, com deformação constante.
- Colapso incremental (Estágio 3): O nível de tensão aplicado é elevado, sendo que uma parte significativa do material está em condição limite (na eminência da ruptura) e as deformações permanentes se acumulam rapidamente, originando a ruptura do material em curto prazo de tempo.

Figura 7 - Tipos de deformação permanente descritos pela teoria do *Shakedown*



Fonte Adaptado de Theyse e*t al.,* 2007

Werkemeister (2003) propôs os seguintes limites para definir as faixas do *Shakedown:* (i) Faixa A: $\varepsilon_{p,5000} - \varepsilon_{p,3000}$< 4,5 x 10^{-5}, (ii) Faixa B: 4,5 x 10^{-5} < $\varepsilon_{p,5000} - \varepsilon_{p,3000}$< 4 x 10^{-4} e (iii) Faixa C: $\varepsilon_{p,5000} - \varepsilon_{p,3000}$> 4 x 10^{-4}.

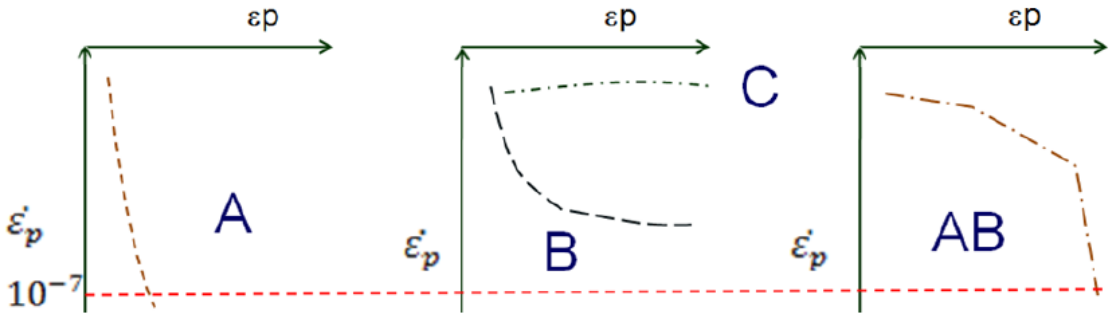
Particularmente com relação ao agregado reciclado de RCD, alguns pesquisadores determinaram limites de *Shakedown* a partir de ensaios triaxiais de deformação permanente (Tabela 14).

Tabela 14 - Exemplos de pesquisas que abordam a teoria do *shakedown* com agregado reciclado de RCD

Autor/Ano	Número de ciclos	Limites de *Shakedown*
Leite (2007)	100.000 até 180.000	*Shakedown* elástico ($\sigma_d/\sigma_3 = 2$) *Creep* plástico (4 ≤σ_d/σ_3<6) Colapso incremental (σ_d/σ_3 = 6,7)
Goméz (2016)	50.000 e não atingiram os 1.000.000	*Shakedown* elástico ($\sigma_d/\sigma_3 = 2$) *Creep* plástico (4 ≤σ_d/σ_3<6) Colapso incremental (6 ≤σ_d/σ_3<8)
Delongui (2016)	80.000	*Shakedown* elástico ($\sigma_d/\sigma_3 < 2$) *Creep* plástico ($\sigma_d/\sigma_3 \geq 4$)

Fazendo um paralelo, Guimarães (2009) propôs um modelo de previsão de deformação permanente para solos tropicais, abordando a questão do *shakedown*. Seguindo as linhas de pesquisas inglesas, Guimarães (2009) introduziu o comportamento AB para os solos nacionais (especialmente para solos lateríticos e lateritas). Neste caso, na faixa AB existem significativas deformações iniciais, seguidas de acomodamento plástico: na faixa A tem-se acomodamento plástico, não havendo problema de afundamentos no pavimento, enquanto na faixa B tem-se escoamento plástico e consequente contribuição para deformação permanente. Por fim, tem-se a faixa C, que apresenta altas taxas de acréscimo de deformações permanentes, levando à ruptura (Figura 8). O aparecimento do fenômeno do *shakedown* se dá quando a taxa de acréscimo de deformação permanente atinge 10^{-7}mm/ciclo de carga (WERKMEISTER *et al.*, 2004; GUIMARÃES, 2009; LIMA, 2016). Entretanto, nesta pesquisa não foi utilizado o modelo de Guimarães (2009), visto que ele não prevê o comportamento de deformações para materiais estabilizados, mas foi aqui apresentado a título de comparação.

Figura 8 - Níveis de comportamento de deformação permanente de solos



Fonte: Guimarães, 2009

2.5 TEMPO DE CURA DE MATERIAIS ESTABILIZADOS

Segundo Xuan *et al.* (2012), o material do tipo Cement Treated Aggregate (CTAM) consiste em uma mistura, em que a quantidade de cimento é relativamente pequena (2% a 4%) e esse serve de aglutinante dos agregados graúdos, necessitando de água para a compactação e hidratação do cimento. O produto final das reações de hidratação do cimento é diferente em agregados e solos: no primeiro as reações originam ligações pontuais entre as partículas e a pasta de cimento, já no segundo ocasiona a formação de uma matriz envoltória entre a pasta de cimento e as partículas (BEJA, 2014).

As características dos materiais que interferem no comportamento mecânico dos CTAMs são a composição do agregado, granulometria, grau de compactação, teor de umidade, teores de cimento e finos, tempo e condições de cura e fatores climáticos (BEJA, 2014).

O agregado reciclado é passível de sofrer auto-cimentação. Diversos fatores influenciam a ocorrência da auto-cimentação, dentre eles pode-se citar: (i) umidade no processo de hidratação, (ii) idade e composição do cimento; (iii) efeito da quantidade de finos e material de enchimento; (iv) temperatura e (v) carbonatação (BREDENKAMP, 2018).

A auto cimentação do agregado reciclado pode ocorrer na compactação do material, onde acontece uma quebra dos agregados cimentícios e o cimento não hidratado tem a possibilidade de se hidratar com a umidade da compactação. Este mecanismo aumenta a rigidez do material devido à reação pozolânica, que influenciará no desempenho a longo prazo deste material (GRUBBA, 2009; SILVA, 2014; BREDENKAMP, 2018).

A auto cimentação é potencialmente benéfico para o uso de ARC, sendo que essa melhora o desempenho frente a parâmetros de cisalhamento e módulo de resiliência, uma vez que o tempo de cura do material é prolongado (ARM, 2000; VAN NIEKERK, 2002). Diversos autores fizeram pesquisas com diferentes tipos de tempo de cura dos agregados reciclados de RCD, tendo como finalidade a análise do comportamento mecânico e auto cimentação do mesmo (Tabela 15).

Tabela 15 - Exemplos de pesquisas que abordaram o tempo de cura em agregados reciclados de RCD

Autor/Ano	Tempo de cura (dias)
Hill *et al.* (2001)	28, 90, 360
Arm (2001)	1, 60
Molenaar e Van Niekerk (2002)	4, 14, 28, 90
Motta (2005)	0, 7, 28, 90, 180
Poon *et al.* (2006)	1, 7
Leite (2007)	4
Gómez (2011)	3, 7, 15, 30, 60, 90
Agrella *et al.* (2011)	3, 7, 28, 90
Beja (2014)	7, 28, 60, 90
Silva (2014)	0, 7, 28, 91
Barisanga (2014)	4
Gómez (2016)	0, 15, 30, 60, 365
Bredenkamp (2018)	1, 30

Por outro lado, os BSMs são materiais tratados com emulsão betuminosa (BSM-E) ou espuma de asfalto (BSM-F), usualmente são constituídos de materiais granulares, no caso materiais previamente tratados com cimento, ou RAP. A

adição do produto asfáltico aumentará a resistência e durabilidade do material e dependendo do teor de asfalto pode proporcionarar uma resistência à flexão – devido a propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico – e diminuirá a suscetibilidade à umidade (ASPHALT ACADEMY, 2009; WIRTGEN, 2012).

O mecanismo de cura destes materiais é significativo uma vez que influenciam no desempenho mecânico futuro dos mesmos. O processo de cura consiste na expulsão de água do material durante a compactação, que continua com a evaporação de água ao longo do tempo (FU *et al.,* 2010; WIRTGEN, 2012; DAL BEN, 2014). Segundo Kim *et al.* (2011), o período de cura depende das temperaturas durante todo o dia, condições climáticas, espessura da camada, tipo de asfalto utilizado, teor de umidade da camada de espuma de asfalto, energia de compactação, volume de vazios e as características de drenagem dos materiais abaixo da camada contendo espuma de asfalto.

É certo que o tempo de cura e a temperatura afetam consideravelmente as propriedades dos materiais estabilizados com espuma de asfalto, entretanto não há consenso quanto à metodologia a se utilizar com relação a estes parâmetros (Tabela 16).

Tabela 16 - Tempo de cura e temperatura sugeridos para materiais estabilizados com espuma de asfalto

Autor/Ano	Metodologia de Cura
Ruckel *et al.* (1982)	1 dia a 40ºC – *curto prazo* 3 dias a 40ºC – *longo prazo*
Marquis *et al.* (2003)	3 dias a 40ºC
Lane e Kazmierowski (2005)	3 dias a 60ºC (1)
Fu *et al.* (2010)	1 dia a 20ºC – *sacos plásticos lacrados* 7 dias a 40ºC – na *estufa sem sacos plásticos*
Kim *et al.* (2011)	0, 7 e 14 dias a 25ºC e 45ºC (2)
Dan Bel (2014)	20 h a 30ºC - *sem sacos plásticos* 2 dias a 40ºC - *sacos plásticos lacrados*

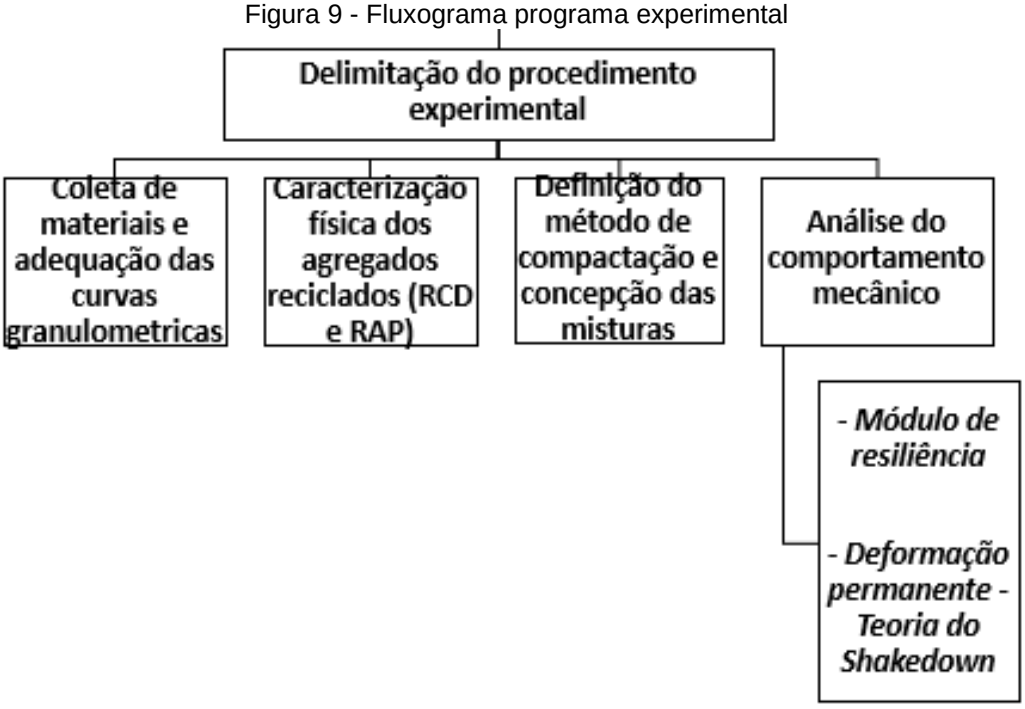
(1) com variação de 4 h e 2ºC; (2) amostras curadas em moldes de tubo PVC fechados após terem sidos curados ao ar durante 0, 1, 3 e 5 h.

Segundo Jones *et al.* (2008), a cura à temperatura de 60ºC é inadequada, visto que em corpos de prova curados a uma temperatura maior que 50ºC já teria ocorrido fluência do ligante asfáltico. Por outro lado, a cura em temperaturas entre 15ºC e 25ºC prejudica a repetibilidade e a reprodutibilidade do procedimento, sendo que estas temperaturas apresentam a influência da umidade do ar (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Assim, o envelhecimento do ligante asfáltico é considerado mínimo na temperatura de 40ºC, portanto essa é a mais utilizada atualmente (ASPHALT ACADEMY, 2009; FU *et al.,* 2010; DAN BEL, 2014).

3.PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito o programa experimental desta pesquisa. Neste estudo foi avaliado um agregado reciclado de RCD (puro e estabilizado com cimento) e um RAP espumado. Estes foram analisados frente os ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência, sendo aferidos com o tempo de cura de 7 dias visando alcançar a rigidez máxima do material. Este trabalho foi dividido em quatro etapas: (i) coleta de materiais e adequação das curvas granulométricas, (ii) caracterização física dos materiais, (iii) definição do método de compactação e concepção das misturas e (iv) análise do comportamento mecânico das misturas em laboratório (Figura 9). Particularmente com relação à análise do comportamento mecânico, foram feitos ensaios considerando a questão da cura, tendo em vista os aspectos apresentados anteriormente no capítulo de revisão bibliográfica. Adicionalmente, ao final foram propostas seções-tipo para reaterro de valas, com base nos resultados obtidos experimentalmente.

Figura 9 - Fluxograma programa experimental



A seguir é ilustrada a matriz de ensaios para os agregados reciclados (Tabela 17):

Tabela 17 - Matriz de ensaios

Ensaios	Agregado RCD	Agregado RAP
Granulometria	X	
Índice de forma	X	
10% finos	X	
Resistência à abrasão	X	
Absorção e densidade aparente do agregado graúdo	X	
Resistência a tração por compressão diametral		X
Módulo de resiliência	X	X
Deformação permanente	X	X

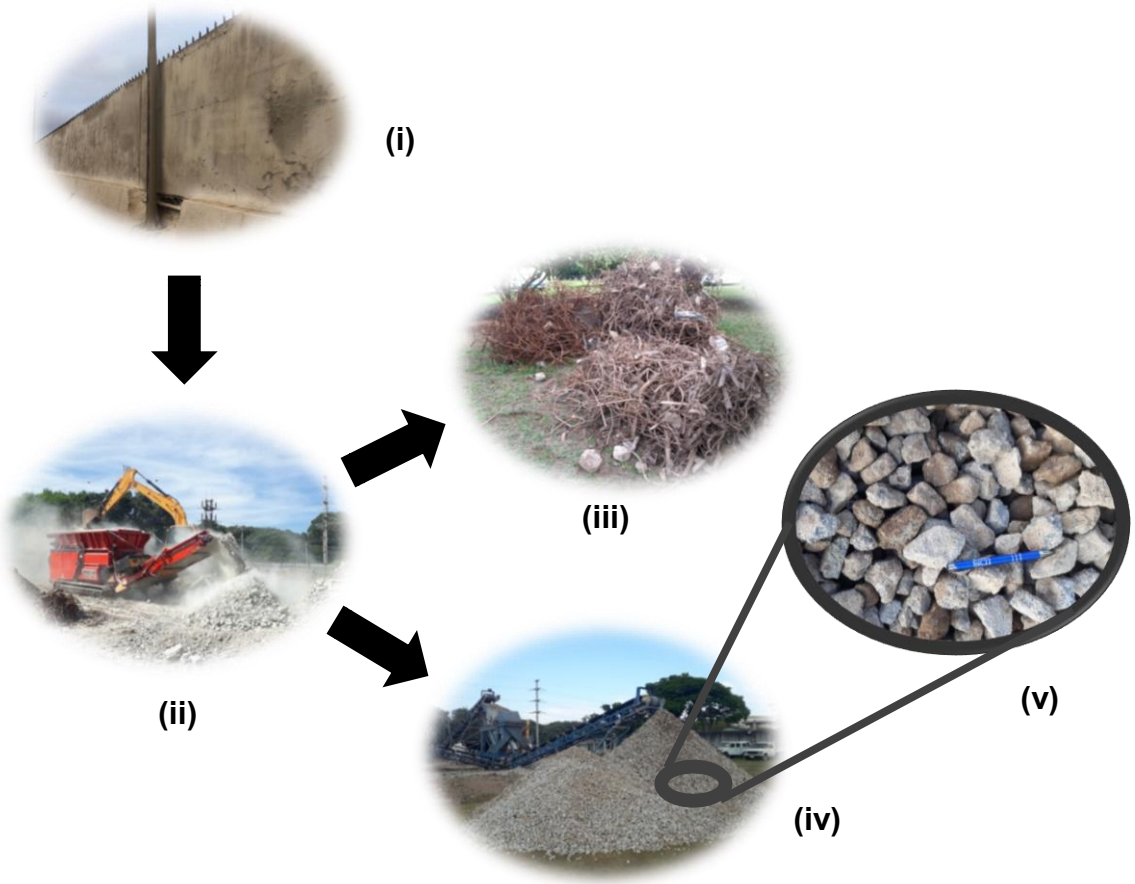
3.1 MATERIAIS

Neste estudo foram analisados dois tipos de agregados reciclados, tendo em vista sua aplicação como material de preenchimento de obras de reaterro de valas. Os dois agregados reciclados avaliados nesta pesquisa foram: (i) resíduo de demolição do muro da raia olímpica da Universidade de São Paulo - Campus Butantã, com e sem a adição de cimento Portland; e (ii) RAP fresado oriundo da BR-070 - Rodovia Ayrton Senna (SP), para produção de mistura asfáltica reciclada a frio com espuma de asfalto.

Agregado reciclado de RCD

O resíduo de demolição passou por processo de beneficiamento, tendo sido produzido um agregado reciclado de RCD, que foi classificado como agregado reciclado de concreto (ARC) por ser originado de demolição de pilares e paredes do muro, cuja composição era exclusivamente de concreto (e aço, que foi retirado anteriormente). O processo de beneficiamento do resíduo consistiu em três etapas: cominuição do resíduo pelo processo de britagem (com britador do tipo martelo), separação direta no britador dos materiais contaminantes e o agregado reciclado; e estocagem do agregado reciclado de RCD em pilhas (Figura 10).

Figura 10 - Beneficiamento do RCD



(i) muro antes da demolição (ii) cominuição do resíduo por meio de britagem (iii) materiais ferrosos (iv) estocagem em pilhas (v) ARC final

Agregado reciclado de RAP

O RAP foi beneficiado na planta de reciclagem da empresa Fremix, situada no Km 11 da Rodovia Ayrton Senna, sentido São Paulo, abaixo do viaduto Imigrante Nordestino. O RAP fresado passou inicialmente por um estudo de dosagem em laboratório, tendo sido espumado e estocado em pilhas cobertas por lonas para aplicação naquela rodovia (Figura 11).

Figura 11 - Estocagem em pilhas do RAP espumado

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização física dos agregados reciclados

Neste tópico serão contemplados os ensaios de granulometria, forma dos agregados, resistência dos agregados graúdos, abrasão Los Angeles. e o método de compactação dos corpos de prova.

3.2.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria do agregado reciclado foi executado segundo o procedimento definido pela DNER-ME 083 (DNER, 1998d). A partir da curva granulométrica, os parâmetros de coeficiente de uniformidade (C_u), coeficiente de curvatura (C_c), D_{10}, D_{30}, D_{50}, D_{60} diâmetro máximo nominal e porcentagem passante na peneira de n° 0,45 mm foram obtidos. Foram observados os limites das curvas granulométricas mencionadas na revisão bibliográfica da Série 880 (SHW, 2016) e da MRWA (MRWA, 2013).

3.2.1.2 Forma dos agregados

A caracterização da forma das partículas que constituíam o agregado reciclado de RCD foi feita por meio do procedimento NBR 5564 (ABNT, 2014), que consiste na medida da relação entre comprimento, largura e a espessura das partículas de agregado, por meio de um paquímetro. Após a medição dos

agregados pode-se classificar o material como cúbico, alongado, lamelar e alongado lamelar (Tabela 18).

Tabela 18 - Classificação da forma dos agregados

Média das relações b/a e c/b	Classificação da forma
b/a > 0,5 e c/b > 0,5	Cúbico
b/a < 0,5 e c/b > 0,5	Alongado
b/a > 0,5 e c/b < 0,5	Lamelar
b/a < 0,5 e c/b < 0,5	Alongado Lamelar

A ETS 001 (PMSP, 2003) e NBR 15116 (ABNT, 2004) aconselham que o agregado reciclado apresente no máximo de 30% das suas partículas lamelares. Não foi encontrado em nenhuma referência ou normativo alusão à verificação da forma dos agregados para o reaterro de valas.

3.2.1.3 Resistência mecânica dos agregados graúdos

A finalidade deste ensaio é determinar a carga necessária para que se gere 10% de finos, em um conjunto de agregados graúdos submetidos a esmagamento mecânico (material passante na peneira de 2,4 mm). Embora não seja um parâmetro considerado em especificações brasileiras para uso de agregados reciclados, têm-se limites impostos por especificações internacionais quanto a porcentagem de finos para a utilização do material reciclado como material de preenchimento, podendo ser até 12% (ASTM D2774, 2012) ou mais que 12% de finos (ASTM D2321, 2018). O ensaio foi executado, apenas para o RCD, com base na norma ME 096 (DNER, 1998a).

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado conforme a norma DNER-ME 035 (DNER, 1998b). No âmbito de materiais de preenchimento não foi encontrado nenhum parâmetro deste ensaio preconizado para o reaterro de valas, sendo que este ensaio foi feito apenas para o agregado reciclado de RCD.

3.2.1.5 Absorção e densidade aparente do agregado graúdo

Os agregados reciclados, de uma forma geral, apresentam baixa densidade, acarretando maior porosidade que agregados naturais, o que demanda uma maior quantidade de água para sua compactação. O ensaio para determinação da absorção e da densidade aparente do agregado graúdo foi baseado na especificação do DNER-ME 081 (DNER, 1998c).

3.2.1.6 Compactação

O método de compactação utilizado para a obtenção do teor ótimo de umidade e peso específico seco máximo de cada material foi obtido em DNIT-ME 164 (DNIT, 2013b). Os agregados reciclados foram compactados conforme detalhamento da Tabela 19.

Tabela 19 - Compactação dos agregados reciclados

Agregado Reciclado	**Diâmetro máximo (mm)**	**Energia de Compactação Proctor**	**Dimensões do Corpo de Prova (mm)**
RCD	19	Intermediária	100 x 200
RCD + Cimento	19	Intermediária	100 x 200
RAP Espumado	19	Modificada	100 x 200

Agregado reciclado de RCD

Para se obter o agregado reciclado de RCD com diâmetro máximo de 32 mm, foi realizada uma adequação na curva granulométrica por meio do processo de escalpo, que consistiu na substituição da porcentagem retida na peneira 50 mm, em quantidades iguais, por material passante na peneira 32 mm e retido na peneira 12,5 mm. Este processo foi realizado devido à necessidade de emprego da relação de 1/5 do diâmetro do corpo de prova para ser representativo em ensaios mecânicos. Foram realizados 17 corpos de prova para determinação da

curva de compactação, a quantidade é justificada pela dificuldade da variação de umidade do agregado reciclado de RCD.

A porcentagem de cimento para a estabilização do agregado reciclado de RCD, foi igual a 3% e sucedeu por meio das pesquisas anteriores realizadas no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) (MOTTA, 2005; LEITE, 2007; BEJA, 2014).

Alguns normativos (SABESP, 2016; PMSP, 2018), para materiais de preenchimento de valas preconizam o uso de energia de compactação Proctor normal, entretanto os corpos de prova ensaiados no laboratório não apresentaram coesão e a energia aplicada não foi suficiente para garantir intertravamento entre as partículas (Figura 12). Portanto, se optou em utilizar a energia de compactação intermediária com a finalidade de buscar um melhor intertravamento entre os agregados. O processo de compactação de agregados reciclados de RCD também tende a promover certa quebra de partículas, que contribuem para maior densificação do material, conforme demonstrado em Leite (2007). Neste caso, o uso de energia superior à normal também seria mais efetivo.

Figura 12 – Agregado reciclado de RCD compactado na energia de compactação normal

No caso desta pesquisa foram utilizadas energias de compactação maiores que as estipuladas por normativos, o que pode se superestimar o comportamento mecânico dos agregados reciclados em estudo, uma vez que no campo não se

obteria a mesma energia de compactação (por meio de equipamentos) ou até mesmo por ser consideradas energias de compactação elevadas do ponto de vista do tipo de tubulação utilizada.

Agregado reciclado de RAP

No caso do RAP, a dosagem foi feita pela empresa Fremix, tendo está utilizado a energia de compactação Proctor modificada.

Conforme descrição da empresa, a curva de compactação foi concebida por meio de a moldagem de misturas com cinco teores distintos de ligante espumado. Neste processo os corpos de prova foram submetidos à estufa na temperatura de 40ºC por aproximadamente 24 h (ASPHALT ACADEMY, 2009) e, em seguida, foram pesados para a determinação da massa específica aparente seca (após a cura). Após a pesagem foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), em que os corpos de prova foram submetidos à condição seca e saturada em tanque com água à temperatura de 24ºC por 24 h. O fato é que existem diferentes tipos de ensaio de preparação de amostras e de compactação de misturas recicladas a frio, variando de país para país.

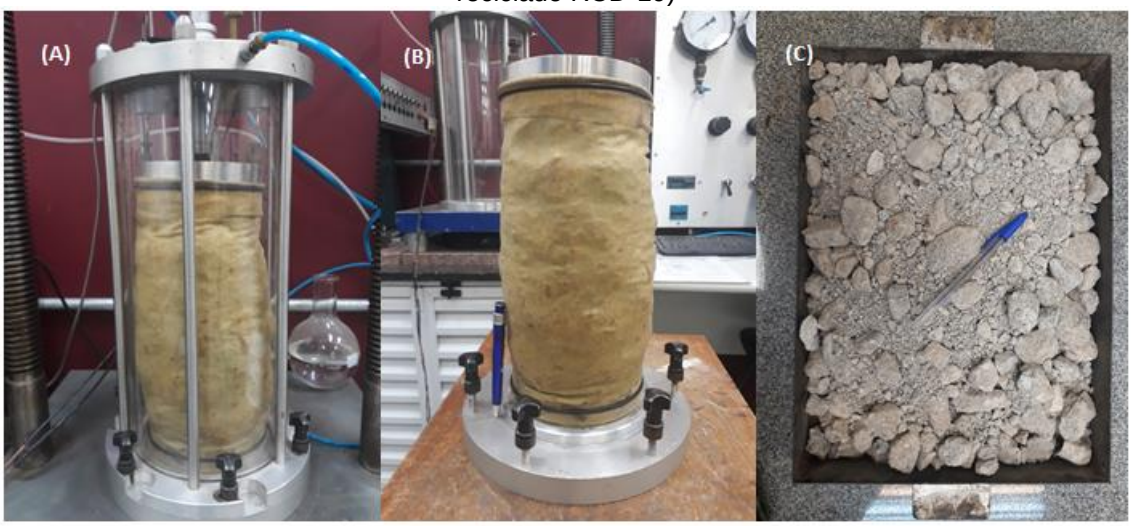
Após a compactação e a cura dos materiais, colocou-se uma membrana de borracha com o auxílio de um encamisador, a qual foi prendida com anéis de borracha (*orings*, do inglês). Transdutores mecânico-eletromagnéticos do tipo LVDT (*Linear Variable Differencial* Transformer) foram então acoplados ao cabeçote (Figura 13).

Figura 13 - Preparação do ensaio triaxial

(a) Topo do corpo de prova com irregularidade (b) capeamento das faces do corpo de prova (c) encamisamento com membrana de borracha e posicionamento de anéis de borracha (d) posicionamento dos LVDTs (e) corpo de prova em câmara triaxial (f) ensaio triaxial com carga repetida

Os ensaios de módulo de resiliência com o RCD-32 não são apresentados a seguir, visto que os corpos de prova não resistiram às tensões de acomodação de σ_3 e σ_d ambas iguais a 0,070 MPa e σ_3 e σ_d respectivamente iguais a 0,070 MPa e 0,210 MPa, acarretando em deformação excessiva do corpo de prova (Figura 14). Isto pode ter ocorrido, devido ao grande número de vazios presentes no corpo de prova e à falta de intertravamento das partículas, uma vez que as partículas maiores estão imersas em uma grande quantidade de partículas finas (formadas após a compactação), o que remete a curva granulométrica do material estudado. (Figura 14c).

Figura 14 – Aparência do corpo de prova no ensaio de módulo de resiliência (agregado reciclado RCD-19)



(a) e (b) Corpo de prova após o condicionamento do ensaio (c) aparência dos agregados pós ensaio

3.2.2 Caracterização mecânica dos agregados reciclados

Neste tópico é apresentada avaliação laboratorial do comportamento mecânico dos agregados reciclados de RCD e RAP, por meio de procedimentos que simulam as solicitações de carga impostas pelo tráfego no pavimento, no caso ensaio triaxial de carga repetida - módulo de resiliência e deformação permanente.

3.2.2.1 Módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados com base na norma DNIT-ME 134 (DNIT, 2018), com uso de equipamento triaxial de carregamento repetido. Adotou-se tempo de cura dos corpos de prova de 7 (sete) dias embora se saiba que ambos os agregados reciclados avaliados possam apresentar incremento de rigidez com maiores tempos de cura, conforme mencionado no Capítulo 2.

A acomodação para cura dos corpos de prova de agregado reciclado de RCD foi feita acondicionando-os em tubos de PVC e guardando-os em uma caixa

contendo serragem. Por outro lado, os corpos de prova das misturas com RAP foram mantidos a uma temperatura de 40ºC em equipamento climatizador.

3.2.2.2 Deformação permanente

Os ensaios de deformação permanente também foram realizados no equipamento triaxial de carregamento repetido. A definição das tensões a serem empregadas no ensaio de deformação permanente em laboratório foi feita por ensaio de módulo de resiliência e cálculo das tensões verticais e horizontais para uma estrutura de pavimento com abertura de vala, por meio do programa ELSYM 5. Com estas informações foi realizado o ensaio de deformação permanente.

Os ensaios foram executados a 3 Hz de frequência, com uma onda semi-senoidal até 200.000 ciclos de carga. O ensaio sucedeu por meio de multiestágios de carregamento, tendo sido aplicadas tensões-desvio segundo as relações σ_d/σ_3 de 1, 3 e 6, sendo que cada relação representa um estágio.

Após os ensaios de deformação permanente, os dados foram analisados sob o ponto de vista da teoria do *Shakedown,* conforme descrito anteriormente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

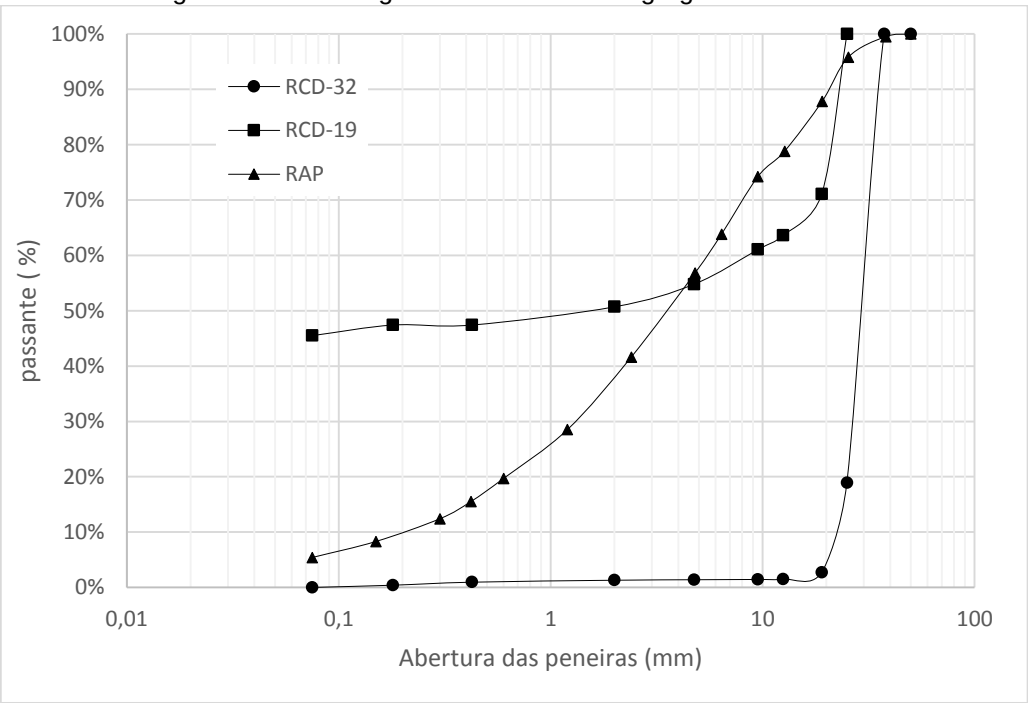
O escopo deste capítulo é a apresentação e análise dos resultados obtidos durante o programa experimental descrito no capítulo anterior. O mesmo está dividido em duas frentes: caracterizações física e mecânica dos agregados reciclados. Desta forma, foi viável estabelecer limitações e critérios para o emprego de agregados reciclados em obras de reaterro de valas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS RECICLADOS

4.1.1 Granulometria

Após o peneiramento do material, obteve-se a massa de agregado em cada peneira e, assim, plotou se a curva granulométrica de cada material estudado (Figura 15).

Figura 15 - Curvas granulométricas dos agregados reciclados



A curva RCD-32 consiste no material coletado na pilha (dimensão máxima igual a 50 mm) com a realização do corte na peneira 32 mm e reposição do material

com a porcentagem passante na peneira de 32 mm e retido na peneira 12,5 mm. A curva RCD-19 representa a curva RCD-32 após a compactação do material com a utilização da energia de compactação intermediária. A curva RAP equivale ao material coletado no canteiro de obras da empresa FREMIX, sem nenhuma alteração.

Com base nas curvas granulométricas calculou se os parâmetros: D_{10}, D_{30}, D_{50}, D_{60}, C_u e C_c(Tabela 19) Os valores indicam que o RCD-32 é considerado pedregulho mal graduado, o RCD-19 não foi possível fazer a classificação devido ao mesmo não apresentar D_{10} e D_{30} e o RAP é bem graduado (LAMBE E WHITMAN, 1979).

Tabela 19 - Parâmetros das curvas granulométricas

	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_c
RCD-32	19	25	25	25	1,31	1,31
RCD-19	-	-	0,425	4,75	-	-
RAP	0,15	1,2	2,4	4,8	32	2

De acordo com as normas D 2774 (ASTM, 2012) e D 2321 (ASTM, 2018) aplicáveis a valas, as curvas RCD-32 e RAP poderiam ser utilizadas para este fim (do ponto de vista do C_u e C_c), uma vez que são classificadas como mal graduada e bem graduada respectivamente.

Também foi possível analisar as curvas granulométricas dos agregados reciclados com base nas faixas granulométricas estabelecidas pela Série 880 (SHW, 2016) (Figura 16) e pela MRWA (MRWA, 2013) (Figura 17). Com base na comparação, verifica-se que apenas o RAP se enquadrou na faixa do Tipo II e com um pequeno desvio nas faixas do Tipo I e Class CC4. No caso do agregado reciclado de RCD, apesar deste não se enquadrar em nenhuma faixa preestabelecida pelas referências apresentas, optou-se por seguir com os testes sem eventuais correções granulométricas ou (re)cominuições, em uma tentativa de investigar o material tal qual foi disponibilizado após seu beneficiamento.

Figura 16 - Comparação das curvas granulométricas dos agregados reciclados com as faixas da SHW

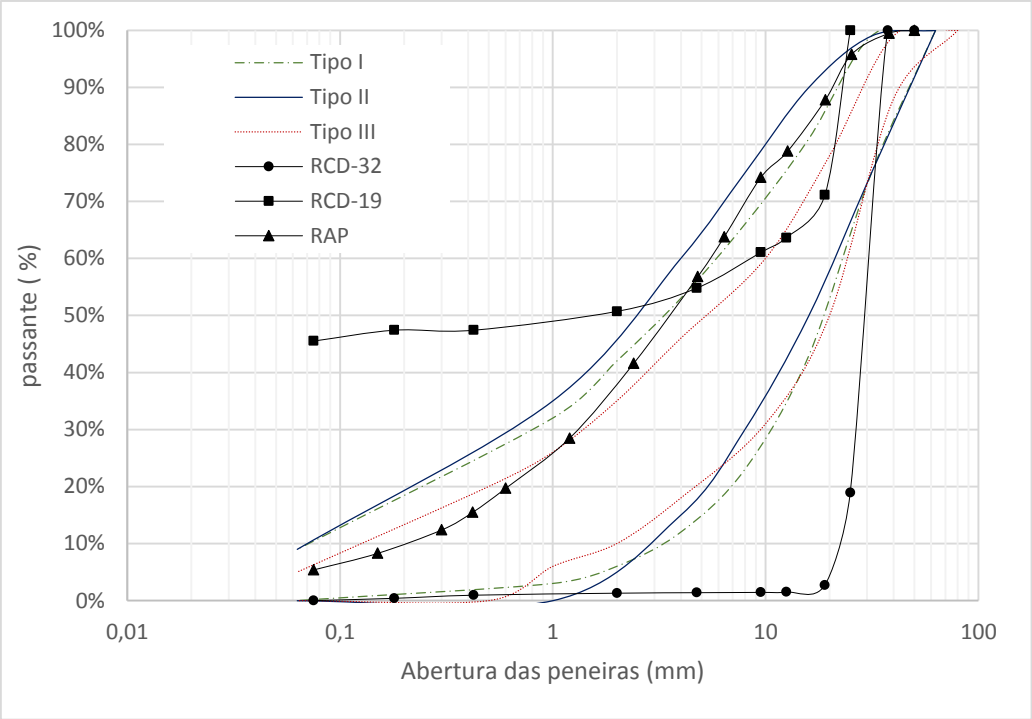
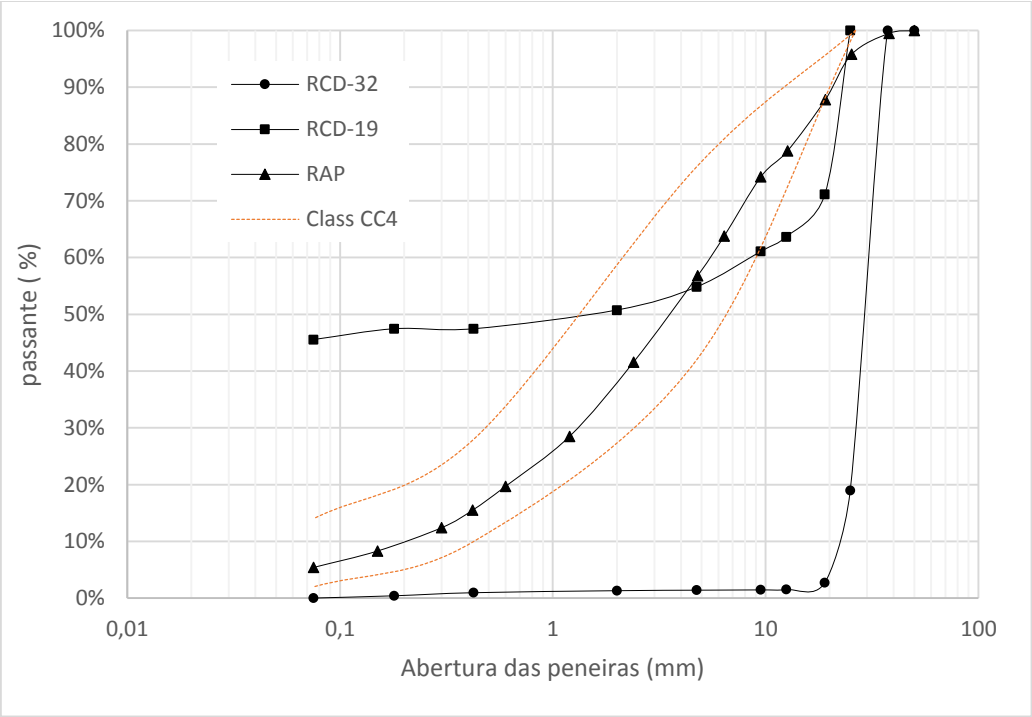


Figura 17 - Comparação das curvas granulométricas dos agregados reciclados com as faixas da MRWA



Após beneficiamento, as partículas são projetadas sobre uma pilha, onde a parte grossa é lançada pra mais longe do transportador e conseguem rolar sobre as laterais das pilhas, acarretando numa pilha mais íngreme devido à formação de um ângulo de repouso. No caso das partículas finas elas tendem ir para o centro da pilha (NOHL E DOMNICK, 2001; CHAVES, 2012). Neste âmbito, pode se justificar a curva granulométrica do RCD-32, visto que no ato da coleta do material foi realizada a homogeneização do material apenas com pá, por não haver uma pá carregadeira à disposição para revolver a pilha.

A utilização de materiais com este tipo de granulometria pode ocasionar futuras deformações permanentes nos materiais da camada de base da vala, uma vez que não há intertravamento necessário para suportar as solicitações do tráfego local.

Como o processo de compactação tende a gerar quebra e, assim, alterar a curva granulométrica, optou-se por avaliar o agregado reciclado de RCD também na granulometria obtida após compactação. Esta iniciativa foi reforçada pelo fato de ter-se observado que o diâmetro máximo pós compactação se aproximaria daquele da mistura com RAP e a comparação seria favorecida.

4.1.2 Forma dos grãos

Este ensaio foi realizado somente com o agregado reciclado de RCD. Foram medidas 442 partículas (62 retidas na peneira 38 mm, 200 na 25 mm e 180 na 19 mm), sendo medidos comprimento, largura e espessura dos grãos, estes aferidos por meio de paquímetro digital. A classificação encontrada é mostrada na Tabela 20.

Tabela 20 - Forma dos grãos e respectivas porcentagens para o agregado reciclado de RCD

Classificação	Peneiras/Porcentagem			Total
	38	25	19	
Cúbica	89%	85%	82%	84%
Alongado	5%	4%	3%	4%
Lamelar	6%	12%	15%	12%
Alongado lamelar	0%	0%	0%	0%

Com base na Tabela 20 pode-se afirmar que o agregado reciclado de RCD tinha predominância de partículas cúbicas (84%), apresentando 12% de partículas lamelares, ou seja, abaixo do limite de 30% de partículas lamelares exigido pela ETS 001 (PMSP, 2003) e pela NBR 15116 (ABNT, 2004).

Do ponto de vista da forma dos grãos referentes ao reaterro de valas pode se apontar que, uma forma mais cúbica dos agregados acarretará um melhor desempenho mecânico, visto que o intertravamento colaborará com melhor desempenho.

4.1.3 Resistência mecânica dos agregados graúdos

Este ensaio foi realizado somente com o agregado reciclado de RCD. Sua execução compreende na penetração de um êmbolo no material acomodado dentro de um cilindro de aço, onde deve-se gerar entre 7,5 e 12,5% de finos. Para o agregado reciclado de RCD, a penetração de êmbolo necessária foi de 24 mm, sendo considerado pela norma como um agregado leve que apresenta vesículas em seu interior. O resultado obtido no ensaio é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultado resistência mecânica (método dos 10% de finos)

Parâmetro do ensaio	
F (kN)	76,87
Finos (%)	11,98
Parâmetro calculado	
F (kN)	93,81
Finos (%)	10

Considerando a porcentagem de finos encontrada nesta pesquisa, o material poderia ser utilizado como material de preenchimento pelas normas D 2774 (ASTM, 2012) e D 2321 (ASTM, 2018).

Os resultados não foram semelhantes aos de Poon e Chan (2006) que encontraram valores em sua pesquisa com agregados reciclados de concreto e de tijolos cerâmicos, respectivamente, de 146 KN e 49 KN. O mesmo aconteceu com o agregado misto estudado por Beja (2014), que obteve valor de 49,1 KN.

Como para a realização deste ensaio foi necessário a produção de agregados, passante na peneira 12,7 mm e retidos na peneira 9,5 mm, visto que pela sua granulometria há quase ausência deste tamanho de grãos. Este processo pode ter mudado as características do material e tornando ele mais friável, ou seja, mais quebradiço.

Segundo Beja (2014), este ensaio é totalmente dependente das características morfológicas do material a que vai se avaliar e indiretamente traduz uma concepção de resistência da matriz pétrea para a composição do agregado reciclado de RCD.

Este ensaio pode servir como norte para futuras conclusões sobre o comportamento de mecânico de agregado reciclado, além de corroborar com os resultados de abrasão Los Angeles.

4.1.4 Abrasão Los Angeles

Para o ensaio de abrasão Los Angeles foi utilizada a graduação F, com aproximadamente 10000 gramas de material, 1000 rotações do tambor e 12 esferas de ferro fundido. O valor da abrasão Los Angeles resultou em 52%, o que pode ser considerado admissível para agregados britados virgens, cujo valor assumido é entre 40 a 55% (BERNUCCI *et al.*, 2006).

De acordo com a Tabela 22, o valor encontrado nesta pesquisa é igual ao de Fernandes (2004), entretanto é um valor alto quando comparado ao de outras pesquisas que encontraram valores entre 31 a 43%. Esta variação para os agregados reciclados de concreto pode se justificar quanto à origem e/ou tipo de concreto utilizado, e também ao tipo de britador no ato da cominuição do material. Este último foi constatado por Tseng (2010), que observou maior abrasão Los Angeles em agregado britado produzido em britador de impacto do que em britador de mandíbula.

Tabela 22 - Exemplos de pesquisas que avaliaram a abrasão em agregado reciclado de RCD

País/Região	**Tipo de RCD**	**Graduação**	**Los Angeles (%)**	**Autor/Ano**
Austrália	Concreto	-	31 (1)	Rahman e*t al.* (2014)
Reino Unido	Concreto	-	32 (1)	Reid (2000)
São Paulo	Concreto	B	32	Tseng (2010)
Brasília	Concreto	B	35	Gómez (2011)
Brasília	Concreto	C	38	Gómez (2011)
São Paulo	Concreto	B	43	Tseng (2010)
São Paulo	Misto	A	43	Beja (2014)
São Paulo	Misto	B	50	Motta (2005)
Belo Horizonte	Concreto	A	52	Fernandes (2004)
Belo Horizonte	Misto	A	55	Fernandes (2004)
Porto Alegre	Misto	G	55	Delongui (2016)
Porto Alegre	Misto	A	57	Delongui (2016)
Porto Alegre	Misto	A	57	Delongui (2016)
Porto Alegre	Misto	F	59	Delongui (2016)
Rio de Janeiro	Misto	C	59	Fernandes (2004)
Porto Alegre	Misto	A	60	Matuella e*t al.* (2015)
Rio de Janeiro	Misto	B	66	Fernandes (2004)

(1) Valores médios

O valor de 52% foi considerado um valor compatível a RCDs do tipo misto, uma vez que apresenta a origem do material é de concreto não estrutural, ou seja, sua maior composição é de areia, cimento e água, além de sua densidade aparente do agregado graúdo teve valor igual 2,14, acarretando a um maior desgaste do material.

Segundo normativos australianos, os valores máximos de abrasão Los Angeles devem ser entre 30 e 35% no caso de materiais de preenchimento em reaterro de valas (VICROADS, 2006). Ou seja, o agregado reciclado de RCD desta pesquisa apresentou um valor superior ao limite permitido naquele país. Da mesma forma, considerando a Série 800 da SHW (2016), o agregado reciclado de RCD deste estudo também apresentou valores maiores que o permitido por esta norma, onde para as granulometrias dos tipos I e II o valor máximo é de 50%, enquanto para o tipo III é de 30%. A alta abrasão pode ser benéfica, visto que pode rearranjar a curva granulométrica original, que é considerada uma *open graded*, ou seja, uma curva formada pela predominância de um único diâmetro de agregado.

4.1.5 Absorção do agregado graúdo

O teor de absorção obtido para a fração graúda do agregado reciclado de RCD foi de 5,72% e a densidade aparente do agregado graúdo teve valor igual 2,14. Cabe mencionar que este resultado ajudou a balizar a determinação do teor de umidade em ensaio de compactação.

Com base na literatura, apresenta-se a Tabela 23 para comparar valores de absorção de agregados reciclados de RCD já estudados por outros autores, em diferentes localidades. Com base na Tabela 23 tem-se a conclusão de quanto à composição do agregado reciclado de RCD, independentemente do tipo, é heterogênea.

Tabela 23 - Exemplos de pesquisas que determinaram a absorção em agregado reciclado de RCD

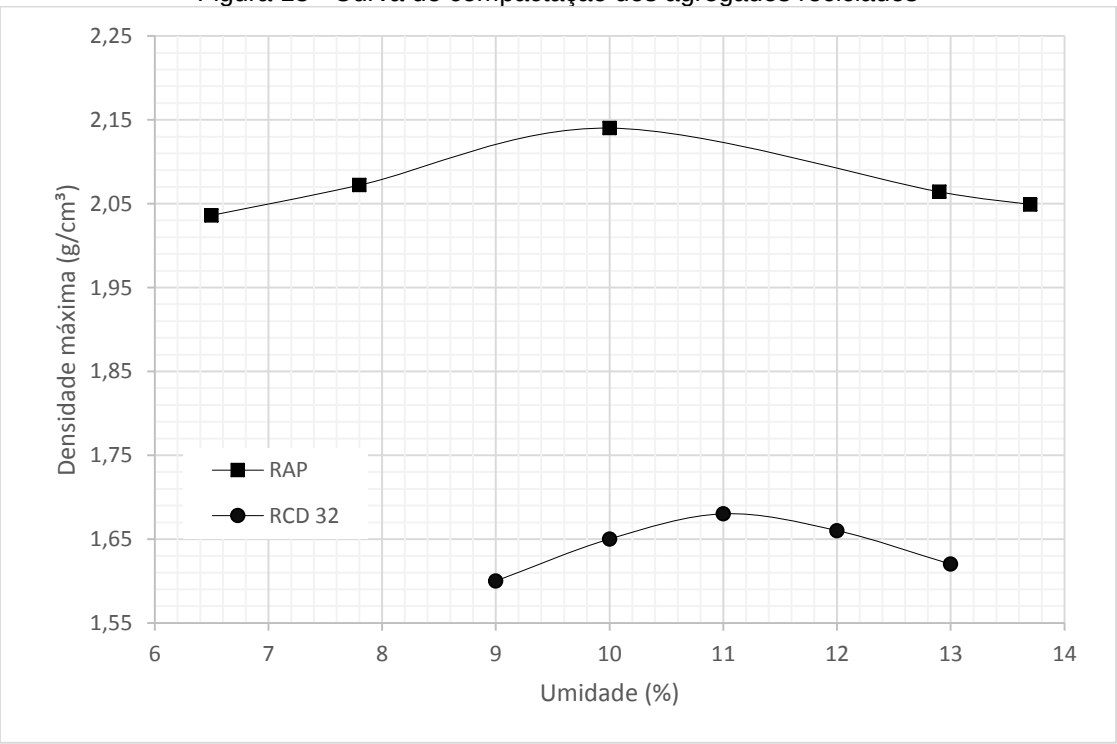
País/Região	**Tipo de RCD**	**Teor de Absorção (%)**	**Autor/Ano**
Hong Kong	Concreto	3,17	Poon *et al*. (2006)
Estados Unidos	Concreto	4,4	Chini *et al*. (2001)
São Paulo	Concreto	4,7 (1)	Tseng (2010)
Brasília	Concreto	7,7	Gómez (2011)
São Paulo	Misto	7,80	Motta (2005)
Santo André	Misto	12,2	Leite (2007)
Hong Kong	Cerâmico	19	Poon e Chan (2006)

(1) valor médio

4.1.6 Compactação

Foram realizados os ensaios para determinação da curva de compactação dos agregados reciclados, a qual foi feita em energia intermediária para o agregado reciclado de RCD e em energia modificada para o agregado reciclado de RAP espumado (Figura 18).

Figura 18 - Curva de compactação dos agregados reciclados



Com base na curva de compactação se obteve uma massa específica aparente seca de 2,072 g/cm³ e um teor de umidade de 10,2% para o RAP espumado. Para o RCD atingiu-se uma massa específica aparente seca de 1,68 g/cm³ e um teor de umidade de 11,2%.

Vale ressaltar que a curva de compactação do agregado reciclado de RCD tem o formato de sino mais plano, que é característico de materiais que toleram uma maior quantidade de variação no teor de umidade, ou seja, o material quebra durante a compactação e sua relação com a água muda, (ARULRAJAH *et al.,* 2013). Este fato realça a dificuldade que se tem para a obtenção de curva de compactação de agregados reciclados (O'MAHONY E MILLIGAN, 1991; MOLENAAR E NIEKERK, 2002; MOTTA, 2005).

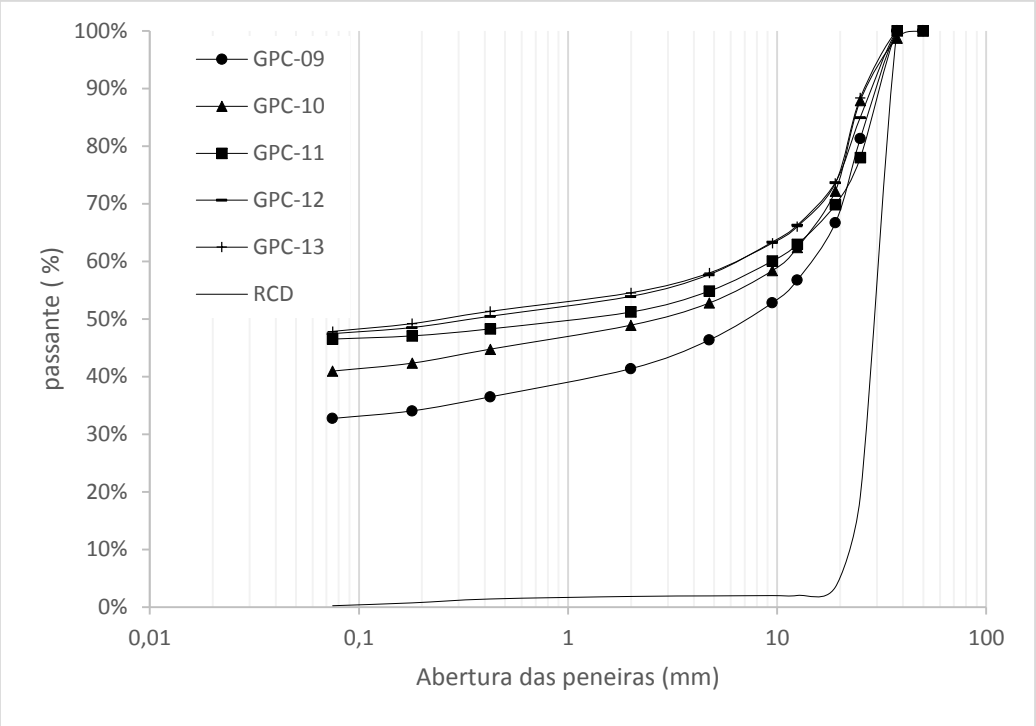
Para a realização dos ensaios mecânicos foram moldados corpos de prova de cada material, na sua respectiva umidade ótima e massa específica aparente seca. No caso do RCD-19 com 3% de cimento foi adicionada esta porcentagem em massa total seca para compor o corpo de prova, antes da adição de água na preparação para a compactação.

4.1.7 Análise de degradação dos agregados

Foi realizado está análise de degradação dos agregados com o objetivo de buscar mais informações sobre o comportamento mecânico dos agregados reciclados.

Particularmente no caso do agregado reciclado de RCD foi feita a análise de quebra dos grãos, por meio da avaliação da granulometria antes e depois da compactação. A Figura 19 ilustra a curva granulométrica do agregado reciclado de RCD antes da compactação (Curva RCD-32) e as curvas intituladas "GPC-XX", sendo que GPC significa granulometria pós compactação e "XX" o teor de umidade em que foi compactado.

Figura 19 - Curvas granulométricas pós compactação do agregado reciclado de RCD



Com base na Figura 19, observa-se que quanto mais úmido estiver o material, maior será a mudança na curva granulométrica do agregado reciclado de RCD com relação a curva do RCD original. Como pode se observar nesta pesquisa ocorreu o comportamento convencional (quanto mais seco, maior a quebra), uma vez que foi constatado que os agregados apenas tinham uma absorção superficial, ou seja, o material no seu interior permanece seco e durante a compactação ocorre a quebra dos grãos e continua a degradação do material que não absorveu a água.

Gómez (2011) afirma que os menores índices de quebra de partículas estão associados a maiores teores de umidade. Isto se deve maior quantidade de água: neste caso, a energia de compactação é transferida para a água, e não para o esqueleto sólido. Esta pesquisa concorda com os resultados encontrados por Gómez (2011).

4.1.8 Dosagem do teor de ligante da mistura RAP

O teor de ligante asfáltico a ser espumado foi definido por meio de ensaios de RTCD, tendo resultado em 2,3% (Figura 20). Embora o teor de 2,2% atenda os limites mínimos da especificação (ITS_{seco} > 225 KPa e $ITS_{saturado}$ > 100 KPa (TG 2 Method 3/2009; TG 2 Method 4/2009)), recomenda-se que seja utilizado um teor de 2,3%, devido à heterogeneidade do material fresado, a fim de garantir o bom desempenho da mistura em campo. A Figura 21 em seguida apresenta os resultados obtidos em relação à massa específica aparente para os diferentes teores de ligante asfáltico analisados.

Figura 20 - Porcentagem de ligante asfáltico espumado *versus* ITS

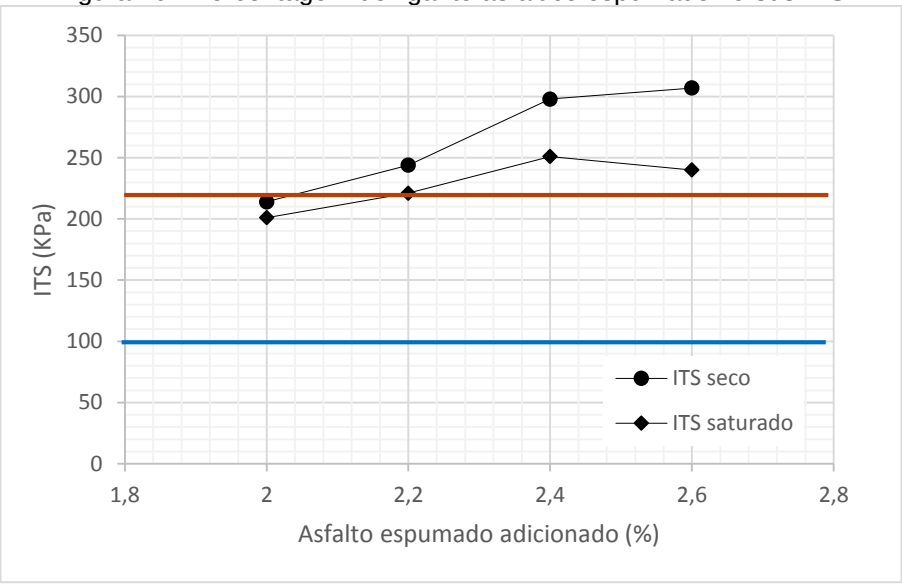
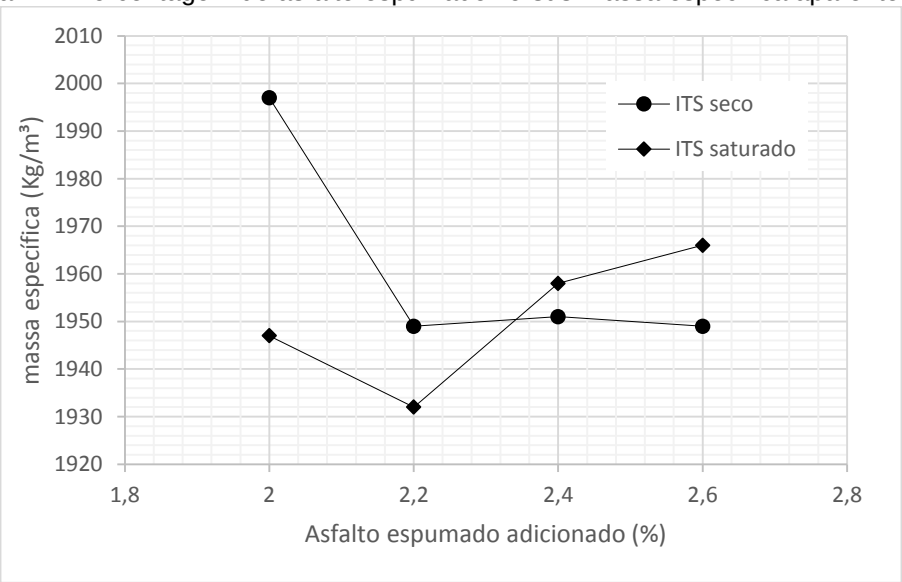


Figura 21 - Porcentagem de asfalto espumado *versus* massa específica aparente seca



A Tabela 24 ilustra os dados gerais da mistura de RAP espumado.

Tabela 24 - Características do RAP espumado

Tipo de ligante	CAP 50/70
Fíller ativo	Cal – CH1
Porcentagem de fíller ativo	1%
Porcentagem de ligante asfáltico	2,3%
Massa específica aparente máxima	2072 Kg/m³
Umidade ótima	5,8%

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS AGREGADOS RECICLADOS

4.2.1 Módulo de resiliência

Os corpos de prova foram moldados conforme o item 3.2.6 e ensaiados tal qual preconiza a norma DNIT ME 134 (DNIT, 2018), utilizando a câmara triaxial num equipamento pneumático de carga repetida.

Buscando uma análise visual mais conveniente dos resultados de módulo de resiliência dos três materiais deste estudo, os mesmos foram plotados todos em um único gráfico (Figura 22). O comportamento dos materiais foi avaliado por meio do modelo MR-σ_3 (em função da tensão confinante), assim mediante os resultados foi possível obter os parâmetros k1 e k2 para cada material (Tabela 25).

Figura 22 - Módulo de resiliência dos agregados reciclados modelo σ_3

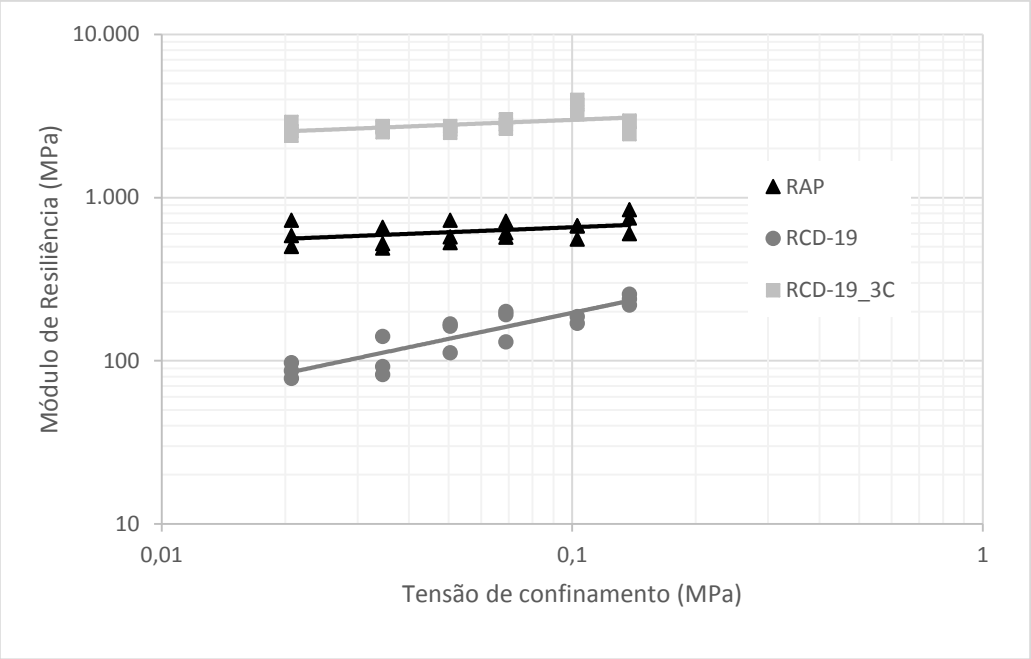


Tabela 25 - Parâmetros do modelo σ_3 na obtenção do módulo de resiliência

Tipo de material	**MR-σ_3**		
	k1	k2	R^2
RAP	831,19	0,1014	0,19
RCD-19	666,65	0,5302	0,80
RCD-19_3C	3781,1	0,1011	0,24

De modo geral, o agregado reciclado de RCD se mostrou mais sensível ao confinamento, apresentando maior valor de módulo de resiliência com a elevação de σ3, tipicamente como ocorre em materiais granulares. Já os outros dois materiais se mostraram menos dependentes do confinamento, com comportamento mais característico de materiais não granulares. Ou seja, o RCD-19_3C e o RAP apresentaram rigidez mais constante com a variação das tensões de confinamento, não se comportando como um material granular.

Os valores obtidos nos ensaios foram de 491 a 845 MPa para o RAP espumado, de 78 a 256 MPa para o RCD-19 e de 2401 a 3982 MPa para o RCD-19_3C. Considerando a tensão confinante com valor igual a 0,1 MPa, obtêm se os valores de 658 MPa para o RAP espumado, de 197 MPa para o RCD-19 e de 2996 MPa para o RCD-19_3C.

Também foi feita uma análise do módulo de resiliência pelo modelo composto ($MR = k_1{\sigma_3}^{k_2}{\sigma_d}^{k_3}$) (Figura 23), a fim de comparar os modelos propostos para análise deste parâmetro, tentar melhorar o R² e ver o modelo em função dos materiais granulares (Tabela 26).

Figura 23 - Módulo de resiliência dos agregados reciclados modelo composto

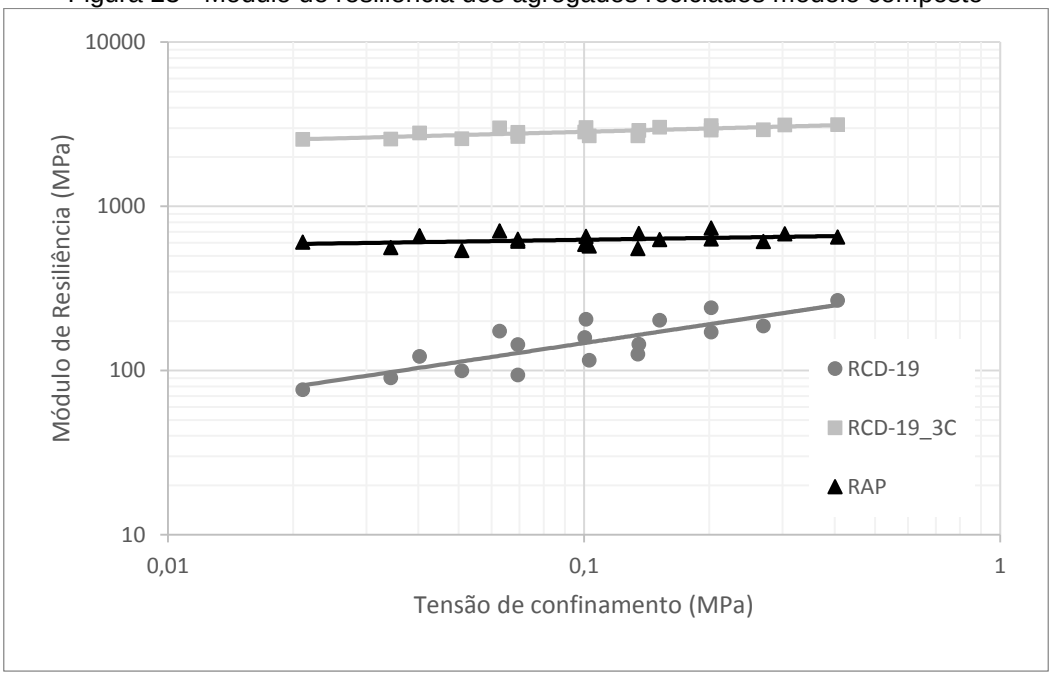


Tabela 26 - Parâmetros do modelo composto na obtenção do módulo de resiliência

Tipo de material	MR-Composto			
	k1	k2	k3	R²
RAP	884,68	0,2045	-0,1077	0,32
RCD-19	560,80	0,2671	0,2422	0,93
RCD-19_3C	3793,23	0,009	0,091	0,22

Conforme a Tabela 26, pode-se afirmar que para esta pesquisa o modelo composto teve um ajuste ligeiramente melhor que o modelo σ_3 (em função da tensão confinante), considerando o valor de R^2. Os valores obtidos nos ensaios foram de 708 MPa para o RAP espumado, de 174 MPa para o RCD-19 e de 3013 MPa para o RCD-19_3C, considerando a tensão confinante e desviadora com

valor igual a 0,1 MPa. Nota se que os valores aumentaram para o RAP e RCD-19_3C e para o RCD-19 teve uma diminuição.

Os valores de módulo do RAP são elevados, uma vez que sua energia de compactação foi modificada e o RAP está estabilizado com asfalto, o mesmo agrega à mistura uma certa coesão, aumentando a rigidez e inserindo um comportamento viscoelástico.

Quando se compara o RCD-19 com o RCD-19_3C é notória a ação do aglomerante hidráulico, causando um aumento da rigidez do material, logo um aumento o módulo de resiliência. Este comportamento também foi obtido em diversas pesquisas com agregado reciclado de RCD (MOTTA, 2005; LEITE, 2007; BEJA, 2014; SILVA, 2014).

Com base na Tabela 27 pode-se afirmar que o RCD-19 e o RCD-19_3C apresentaram valores de módulo de resiliência compatíveis com resultados observados em outras pesquisas com agregado reciclado de RCD. Nota-se que o módulo de resiliência dos agregados reciclados de RCD apresenta uma grande amplitude de valores, os quais dependem de fatores como grau de compactação, tempo de cura, granulometria, umidade e nível de carregamento são fatores que impactam este parâmetro (MOLENAAR e VAN NIEKERK, 2002; STOLLE *et al.,* 2009).

Tabela 27 - Módulo de resiliência de agregados reciclados de RCD – outras pesquisas

Autor/Ano	Tipo de material	Módulo de Resiliência (MPa)
Delongui (2016) (1)	Misto	30 a 600
Matuella *et al*. (2015) (1)	Misto	40 a 300
Matuella *et al*. (2015) (1)	Misto + 3% cimento	70 a 1170
Gómez (2011)	Concreto	90 a 310
Motta (2005) (1)	Misto	140 a 590
Fernandes (2004) (1)	Misto	160 a 360
Leite (2007)	Misto	160 a 440
Fernandes (2004) (1)	Concreto	200 a 380
Motta (2005) (1)	Misto + 4% cimento	700 a 1180

(1) valores aproximados

Já no caso do agregado reciclado de RAP espumado, os valores de módulo de resiliência são similares aos encontrados por Kuchiishi *et al.* (2019) (entre 620 a 1020 MPa) e menores que a pesquisa de Guatimosim (2015) (857,3 a 1360,7 MPa), isto devido a sua compactação ser na energia modificada. Entretanto, a compactação foi feita de maneira diferente, tendo sido usada nesta pesquisa a compactação dinâmica e em Kuchiishi *et al.* (2019) a compactação vibratória, que representa o que acontece quando compactamos materiais de valas.

No que tange o módulo de resiliência para o reaterro de valas, mostra-se um parâmetro bom para a caracterização mecânica dos materiais, uma vez que o material é ensaiado por pares de tensões confinante e desvio que podem representar o que ocorre no campo. Entretanto, deve-se estudar a influência deste parâmetro quando ensaiados com materiais compactados por vibração ou por soquetes, sendo que em campo é utilizada a vibração para compactar os materiais de preenchimento e envoltória.

4.2.2 Deformação permanente

Este ensaio foi realizado com a finalidade de previsão das deformações plásticas que são originadas pela passagem do tráfego no pavimento. As amostras dos materiais em questão foram moldadas nas dimensões de 10 x 20 cm e ensaiadas em multiestágios.

Os ensaios em multiestágios apresentam o propósito de simular, da mesma forma que no campo, como se comportariam as deformações permanentes frente à mudança no tipo de tráfego (DELONGUI, 2016). Em laboratório, o ensaio foi feito com a mudança da relação de tensões σ_d/σ_3, sendo essa da menor relação para a maior, mantendo o teste com o mesmo corpo de prova.

Para a realização do ensaio de deformação permanente, procedeu-se a uma avaliação prévia no programa computacional ELSYM 5. Neste caso, fez-se uma análise de tensões em uma estrutura hipotética de pavimento em que seria instalada uma vala, utilizando-se os resultados do ensaio de módulo de resiliência dos materiais estudados (σd com valor igual a 0,1 MPa) e atribuindo-se coeficientes de Poisson (Tabela 28) e outros parâmetros da literatura.

Tabela 28 - Dados de entrada do programa ELSYM 5

Caso	Estrutura	Espessura (cm)	MR (MPa)	Coeficiente de Poisson
1	CBUQ	10	4500	0,35
	RCD	20	197	0,40
	Areia	∞	100	0,45
2	CBUQ	10	4500	0,35
	RCD_3C	20	2995	0,40
	Areia	∞	100	0,45
3	CBUQ	10	4500	0,35
	RAP	20	658	0,40
	Areia	∞	100	0,45

As tensões verticais foram consideradas verificadas abaixo e entre as rodas, sendo os resultados retratados relativos ao topo da camada do material de preenchimento (Tabela 29), que no estudo de deformação permanente é considerado o ponto mais importante, visto que apresenta a maior tensão de compressão.

Tabela 29 - Tensões verticais na camada de agregado reciclado pelo ELSYM 5

Caso	Material de Preenchimento	σ_1 (Kgf/cm²)
1	RCD	1,22
2	RCD_3C	2,03
3	RAP	1,44

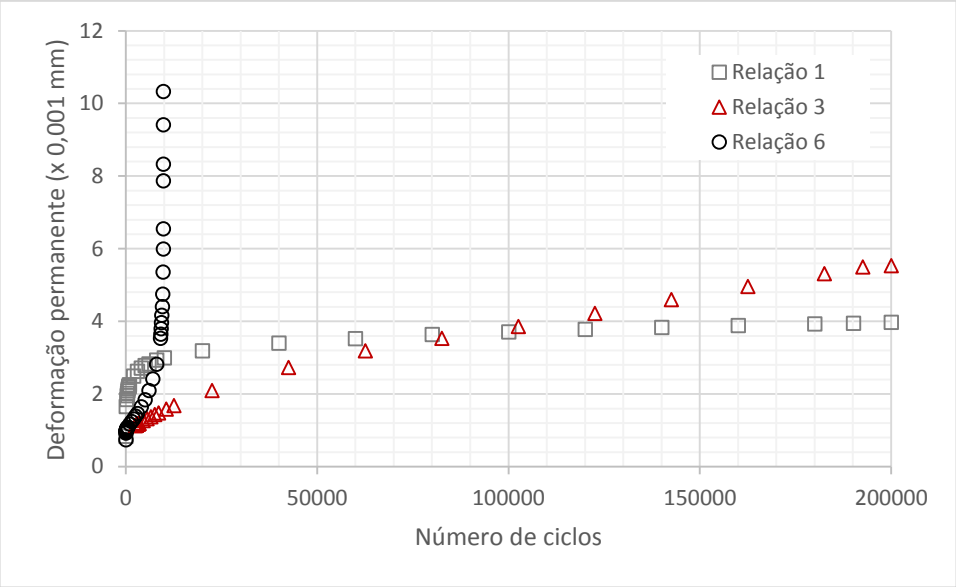
De posse da tensão principal obtida pelo programa ELSYM 5, buscou-se analisar a deformação permanente por meio da relação de tensões σ_d/σ_3, com base na condição de solicitação do tráfego avaliada na estrutura hipotética (Tabela 30).

Tabela 30 - Relação de tensões delimitada para os ensaios de deformação permanente

Caso	Material	σ_d (kgf/cm²)	σ_3 (kgf/cm²)	σ_d/σ_3
1	RCD	0,61	0,61	1
		0,90	0,30	3
		1,05	0,17	6
2	RCD_3C	1,02	1,02	1
		1,53	0,51	3
		1,71	0,28	6
3	RAP	0,70	0,70	1
		1,07	0,35	3
		1,22	0,20	6
		1,28	0,14	9

A Figura 24 ilustrada o comparativo entre as evoluções das deformações permanentes para o agregado reciclado de RCD ensaiado em multiestágios.

Figura 24 - Evolução das deformações permanentes para o agregado reciclado de RCD

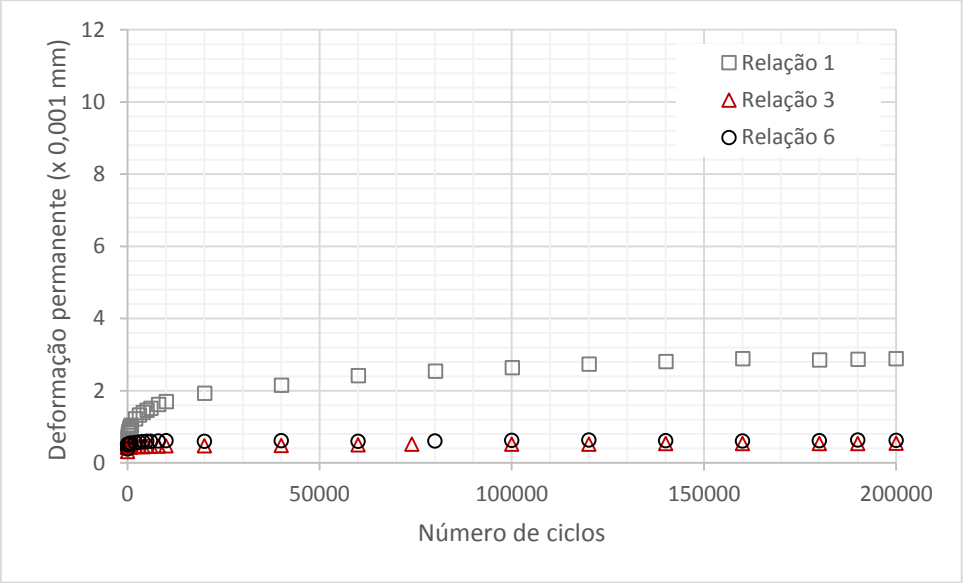


A partir dos resultados acima pode se afirmar que:

- O agregado reciclado de RCD apresentou uma tendência de estabilização após uma deformação permanente inicial (acomodação) na relação menor (1);
- Em relação intermediária (3), o material mostrou uma tendência de elevação contínua e sem grandes gradientes frente à deformação permanente, mesmo na fase inicial de carregamento;
- Em relação mais elevada (6), o material apresentou o colapso total, atingindo a deformação de 10% da altura do corpo de prova, que foi o critério de ruptura estabelecido para a finalização do ensaio (proposto por Malysz (2004) em seu estudo);
- A deformação permanente será tanto maior quanto menor for a sua tensão confinante e maior a sua tensão desviadora, ou seja, a tensão de confinamento propende a inibir a deformação permanente e o acréscimo da tensão-desvio tende a aumentar o aparecimento de deformações permanentes.

Os resultados do ensaio de deformação permanente para o RCD estabilizado com cimento são mostrados a seguir na Figura 25.

Figura 25 - Evolução das deformações permanentes para o agregado reciclado RCD_3C

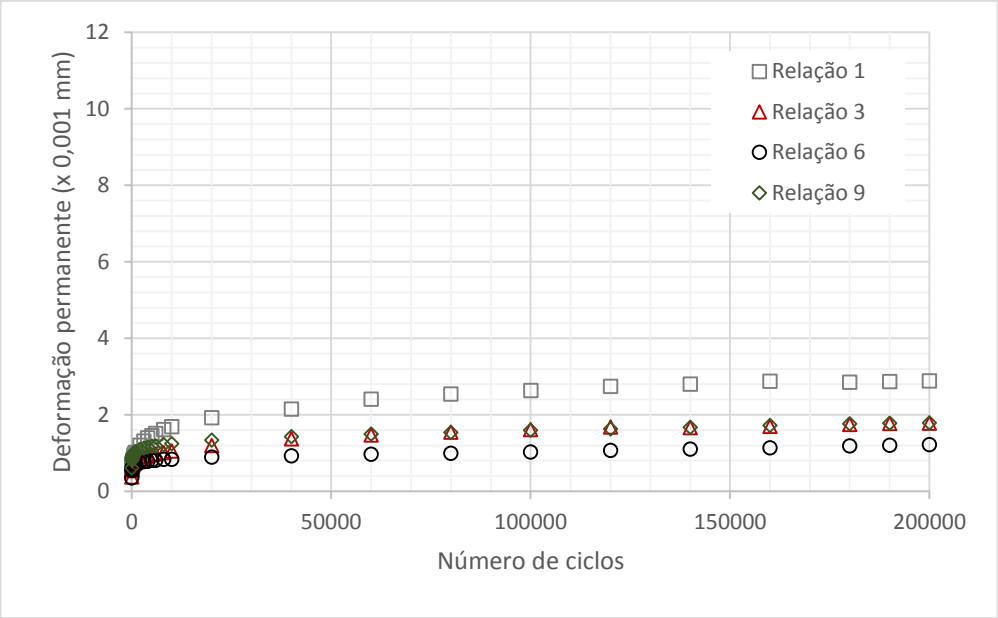


Com base na Figura 25, pode se afirmar que:

- O material apresentou alguma deformação permanente inicial (fase de acomodação) e um comportamento de estabilização após esta fase em menor relação (1);
- Nas relações de intermediária a alta (3 e 6), o material apresentou comportamento semelhante entre ambas, com a interação entre tensões desviadora e confinante com pouca influência nos resultados obtidos. Ou seja, a mistura de cimento ao agregado reciclado de RCD tornou-o mais estável, mesmo em relação de tensões mais elevadas.

A evolução da deformação permanente do RAP espumado é ilustrada na Figura 26.

Figura 26 - Evolução das deformações permanentes para o RAP



Após a análise dos resultados para o material RAP, pode se afirmar que:

- Em baixa relação (1) o material obteve as maiores deformações permanentes iniciais, ou seja, mesmo sob baixos carregamentos o material sofre uma acomodação inicial;
- Com a relação 03 o material obteve as menores deformações permanentes iniciais, tendo em seguida a estabilização do mesmo, o que pode afirmar que o material já estava estabilizado após os ciclos já aplicados (relação 1).
- As relações 6 e 9 tiveram comportamentos semelhantes, entretanto com deformações permanentes maiores que a relação 3;

No caso do RCD o material resistiu às deformações, entretanto teve um comportamento de colapso não resistindo a relação 6 imposta, ou seja, no campo se no material fosse aplicado este carregamento o material iria sofrer ruptura. Diferente do RCD_3C e o RAP resistiram todos os carregamentos aplicados e não mostraram nenhuma tendência de colapso do material, ou seja, não sofreria deformação permanente com estes carregamentos.

Mediante os resultados obtidos nos ensaios de deformação permanente foram propostos modelos para prever a deformação permanente dos agregados reciclados desta pesquisa em função do número N de ciclos utilizados no ensaio. Para a previsão foram utilizados os modelos de Monismith *et al.* (1975) (Tabela 31) e de Barksdale (1972) (Tabela 32).

Tabela 31 - Modelo obtido com os dados de deformação permanente desta pesquisa pelo modelo de Monismith *et al*. (1975)

Caso	**Material**	σ_d/σ_3	**Modelo de Monismith *et al.* (1975)**	**R²**
1	RCD	1	$\varepsilon_p = 0{,}9111\ N^{0{,}1254}$	0,9343
		3	$\varepsilon_p = 0{,}0680\ N^{0{,}3519}$	0,9879
		6	$\varepsilon_p = 0{,}2475\ N^{0{,}2978}$	0,6822
2	RCD_3C	1	$\varepsilon_p = 0{,}2625\ N^{0{,}1995}$	0,9988
		3	$\varepsilon_p = 0{,}3599\ N^{0{,}0314}$	0,8025
		6	$\varepsilon_p = 0{,}4315\ N^{0{,}0326}$	0,8467
3	RAP	1	$\varepsilon_p = 0{,}2931\ N^{0{,}1886}$	0,9948
		3	$\varepsilon_p = 0{,}3094\ N^{0{,}1398}$	0,9858
		6	$\varepsilon_p = 0{,}3834\ N^{0{,}0892}$	0,9571
		9	$\varepsilon_p = 0{,}5667\ N^{0{,}0900}$	0,9833

Tabela 32 - Modelo obtido com os dados de deformação permanente desta pesquisa pelo modelo de Barksdale (1972)

Caso	Material	σ_d/σ_3	Modelo de Barksdale (1972)	R²
1	RCD	1	$\varepsilon_p = 0{,}1214 + 0{,}7210 \log N$	0,9990
		3	$\varepsilon_p = -6{,}1565 + 2{,}062 \log N$	0,9332
		6	$\varepsilon_p = -2{,}7401 + 1{,}8189 \log N$	0,4505
2	RCD_3C	1	$\varepsilon_p = -1{,}1520 + 0{,}7456 \log N$	0,9775
		3	$\varepsilon_p = 0{,}3510 + 0{,}0328 \log N$	0,8414
		6	$\varepsilon_p = 0{,}4221 + 0{,}0406 \log N$	0,8872
3	RAP	1	$\varepsilon_p = -0{,}7368 + 0{,}6498 \log N$	0,9467
		3	$\varepsilon_p = -0{,}0967 + 0{,}3242 \log N$	0,9269
		6	$\varepsilon_p = 0{,}2515 + 0{,}1607 \log N$	0,9478
		9	$\varepsilon_p = 0{,}3478 + 0{,}2468 \log N$	0,9510

Os R² da maior parte das relações foram altos, exceto do RCD relação 6 com valores iguais de 0,6822 (Monismith *et al.* (1975)) e 0,4505 (Barksdale (1972)), que se deve ao comportamento de colapso, ou seja, com cada aplicação de carga o material se deformava mais até atingir a ruptura.

Com o intuito de comparação foi formulada a Tabela 33 que determina a previsão de deformação permanente em função do número N de ciclos usados no ensaio, tanto pelos modelos de Monismith *et al.* (1975) e de Barksdale (1972). Estes podem então ser comparados com os valores obtidos nos ensaios laboratoriais.

Tabela 33 - Comparativo entre as deformações permanentes obtidas pelo ensaio e pelos modelos de previsão

Caso	Material	σ_d/σ_3	Ciclos	ε_{p-M}	ε_{p-B}	ε_{p-E}	$\varepsilon_{p-E} - \varepsilon_{p-M}$	$\varepsilon_{p-E} - \varepsilon_{p-B}$
1	RCD	1	200000	4,21	3,94	3,97	+ 0,24	- 0,03
		3	200000	4,99	4,77	5,54	- 0,55	- 0,77
		6	9810	3,82	4,52	10,33	- 6,50	- 5,81
2	RCD_3C	1	200000	3,00	2,80	2,89	0,11	- 0,09
		3	200000	0,53	0,52	0,55	- 0,02	- 0,02
		6	200000	0,64	0,64	0,63	+ 0,02	+ 0,01
3	RAP	1	200000	2,93	2,71	2,89	+ 0,04	- 0,18
		3	200000	1,70	1,62	1,78	- 0,08	- 0,16
		6	200000	1,14	1,10	1,22	-0,08	- 0,12
		9	200000	1,70	1,66	1,79	-0,09	- 0,14

ε_{p-M}**:** Modelo de Monismith *et al* (1975); ε_{p-B}: Modelo de Barksdale (1972); ε_{p-E}: Ensaio

Com base na Tabela 33, pode-se perceber que o modelo de previsão exponencial de Monismith *et al*. (1975) denota geralmente resultados ligeiramente maiores que o modelo de previsão logarítmico de Barksdale (1972), conclusão está que também foi obtida por Leite (2007) e Beja (2014). Ambos os modelos não apresentaram boa compatibilização com as relações 3 e 6 do agregado reciclado de RCD, o que pode ter ocorrido pelo fato do material ter apresentado nestas duas situações, respectivamente, taxa elevada e constante de crescimento da deformação permanente e colapso.

Quanto à evolução da deformação permanente nos materiais, pode-se afirmar que a estabilização com cimento no material RCD foi um ponto positivo, reduzindo deformações permanentes em relação ao mesmo material sem a adição do aglomerante hidráulico, principalmente no caso de relação 6, em que se evitou sua ruptura.

O RAP apresentou melhor comportamento frente à deformação permanente, em comparação com o RCD: os valores obtidos foram iguais ao material RCD_3C

na relação 1 e superiores em duas e três vezes, respectivamente, nas relações 3 e 6, o que foi justificado pela presença de ligante asfáltico no material.

No caso do reaterro de valas, os materiais podem ser utilizados como materiais de preenchimento com restrição para o RCD, que vai depender do tipo de carregamento aplicado sobre ele ou utilizar algum tipo de reforço em conjunto.

4.2.2.1 Teoria do *Shakedown*

Para se obter esta análise os resultados foram plotados conforme proposto por Werkmeister *et al*. (2001), onde no eixo das ordenadas está representada a taxa de acréscimo de deformação permanente por número de ciclos e no eixo das abscissas a própria deformação permanente. Os resultados obtidos na presente pesquisa são apresentados a seguir, sendo a Figura 27 relativa ao material RCD, a Figura 28 ao material RCD_3C e a Figura 29 ao material RAP.

Figura 27 - Análise segundo a teoria do *Shakedown* do material RCD

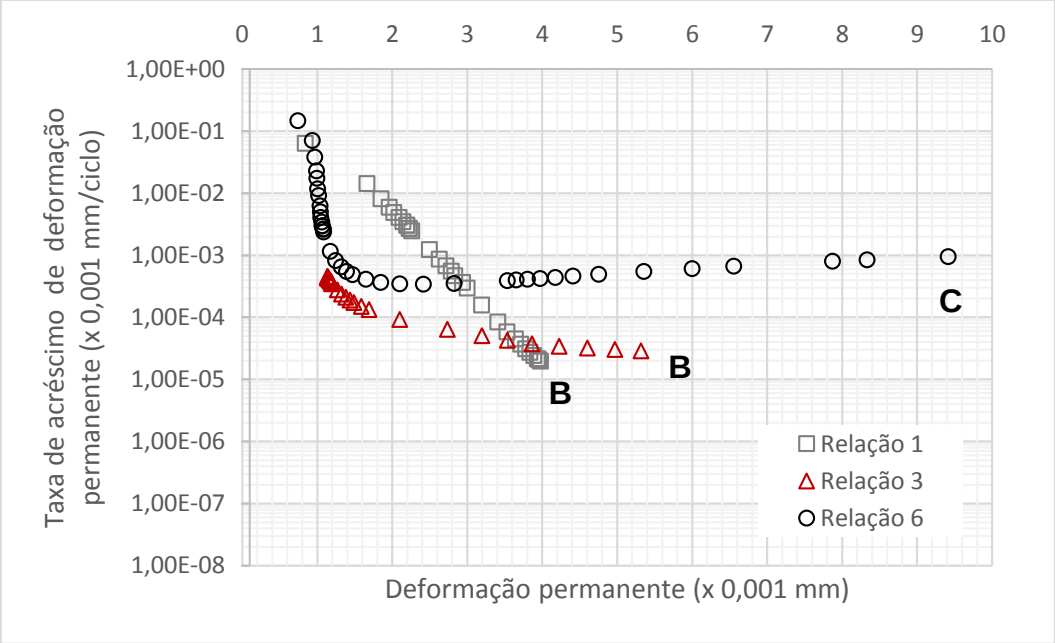


Figura 28 - Análise segundo a teoria do *Shakedown* do material RCD_3C

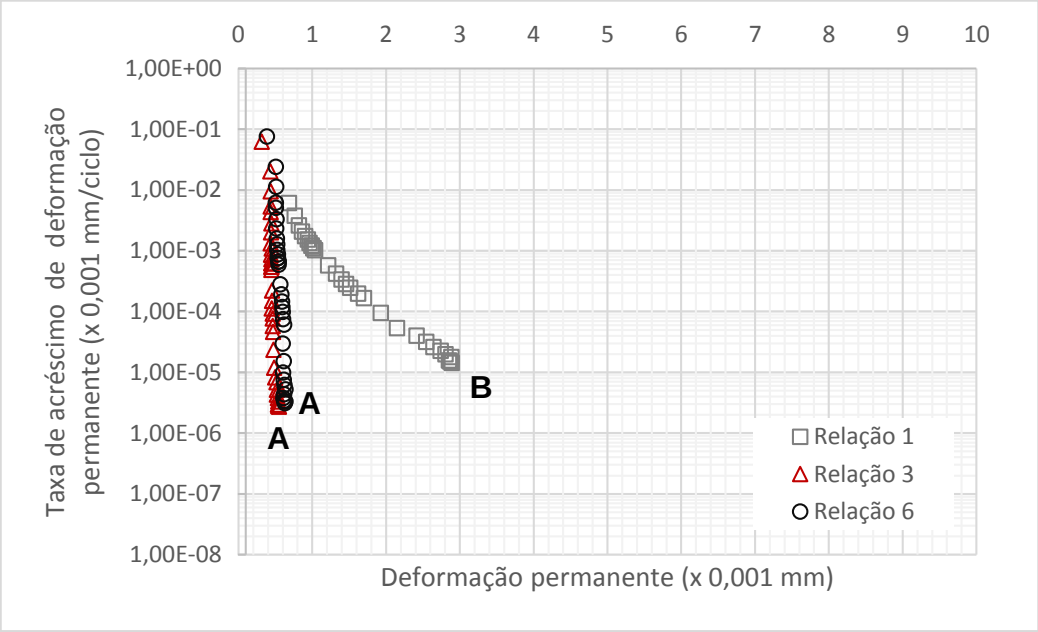
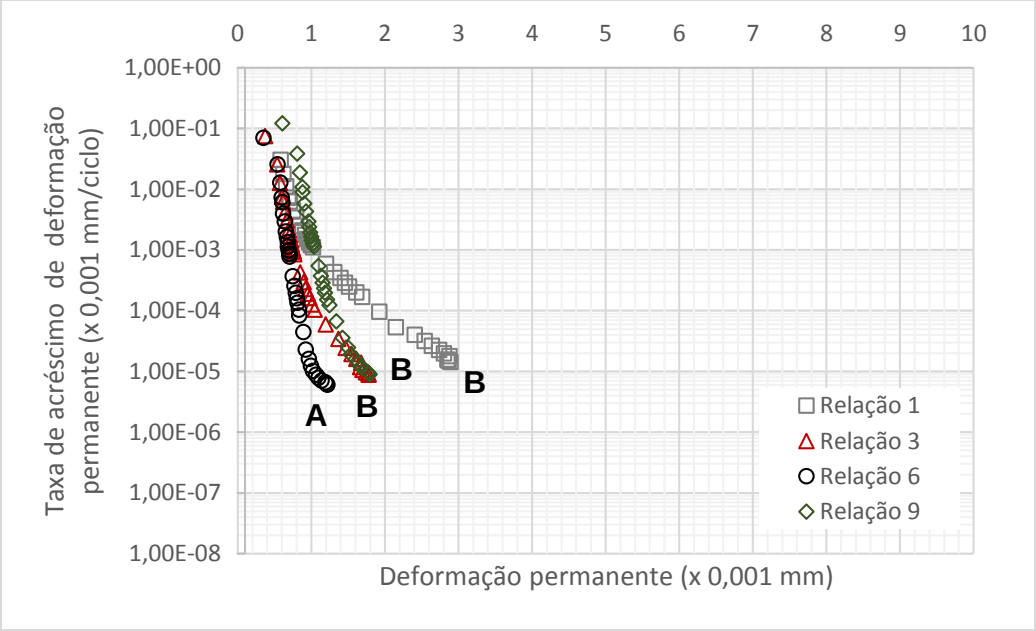


Figura 29 - Análise segundo a teoria do *Shakedown* do material RAP



Baseado nestas figuras, é plausível afirmar que:

- O *Shakedown* elástico (Faixa A) foi identificado nas relações 3 e 6 do RCD_3C e na relação 6 do RAP, visto que as mesmas apresentam o formato retilíneo ou convexo, que configuram este comportamento;

- O Colapso Incremental (Faixa C) é representado por curvas com tendência a se tornarem horizontais, logo este comportamento foi identificado na relação 6 do RCD;
- O *Creep* Plástico ou *Shakedown* Plástico (B) corresponde às outras curvas que não representam os comportamentos anteriores, ou seja, as relações 1 e 3 do RCD, a relação 1 do RCD_3C e as relações 1, 3 e 9 do RAP;
- Na relação 3 do RCD, o arqueamento da curva aponta que a deformação permanente iria se acentuar ainda mais antes de chegar no colapso incremental, ou seja, o aumento no número de ciclos acarretaria a curva a entrar na faixa C.
- O material RCD não apresentou comportamento de faixa A.

Após análise dos resultados de deformação permanente frente a teoria do *Shakedown*, foram estabelecidos os seguintes limites para os materiais estudados nesta pesquisa (Tabela 34).

Tabela 34 - Limites do *Shakedown* para os materiais desta pesquisa

Caso	Material	Limites do *Shakedown*
1	RCD	*Shakedown* Plástico ($1 \leq {}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} < 3$)
		Colapso Incremental (${}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} = 6$)
2	RCD_3C	*Shakedown* Elástico ($1 \leq {}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} < 3$)
		Shakedown Plástico (${}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} > 6$)
3	RAP	*Shakedown* Elástico (${}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} = 6$)
		Shakedown Plástico ($1 < {}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} < 3$; ${}^{\sigma_d}/_{\sigma_3} > 9$)

Os limites do *Shakedown* são bons parâmetros para uma solução de projeto de reaterro de valas, visto que eles ilustram (tanto em gráficos, como em intervalos) o comportamento mecânico frente a deformação permanente. Além de serem de fácil entendimento após uma breve explicação das faixas do *Shakedown*, logo podem ser considerados para aferir o desempenho de materiais alternativos e/ou virgens na estrutura da vala.

4.3 PROPOSTAS DE SEÇÕES-TIPO PARA REATERRO DE VALAS

Com base nos ensaios laboratoriais foram propostas algumas seções-tipo para reaterro de valas urbanas, que foram obtidas com auxílio do programa ELYSM 5, do mesmo modo que foi realizado para encontrar as tensões do ensaio de deformação permanente e foi utilizada a carga de 20 kN (Figura 30). Os resultados são mostrados na Tabela 35. É importante ressaltar que a camada de envoltória da tubulação tem espessura variável, logo é função de cada projeto e suas particularidades (tipo de tráfego, tipo de tubulação, tipo de solo remanescente, entorno das paredes da vala, dentre outros). Outro ponto que deve ser apontado é que não foi possível indicar uma seção apenas com o agregado reciclado de RCD, devendo este ser combinado com camada de agregado reciclado de RAP ou misturado a cimento. Isto porque foram encontradas grandes deflexões e altas tensões no topo da camada de areia (para o tráfego analisado).

Figura 30 – Seções-tipo propostas para os materiais desta pesquisa

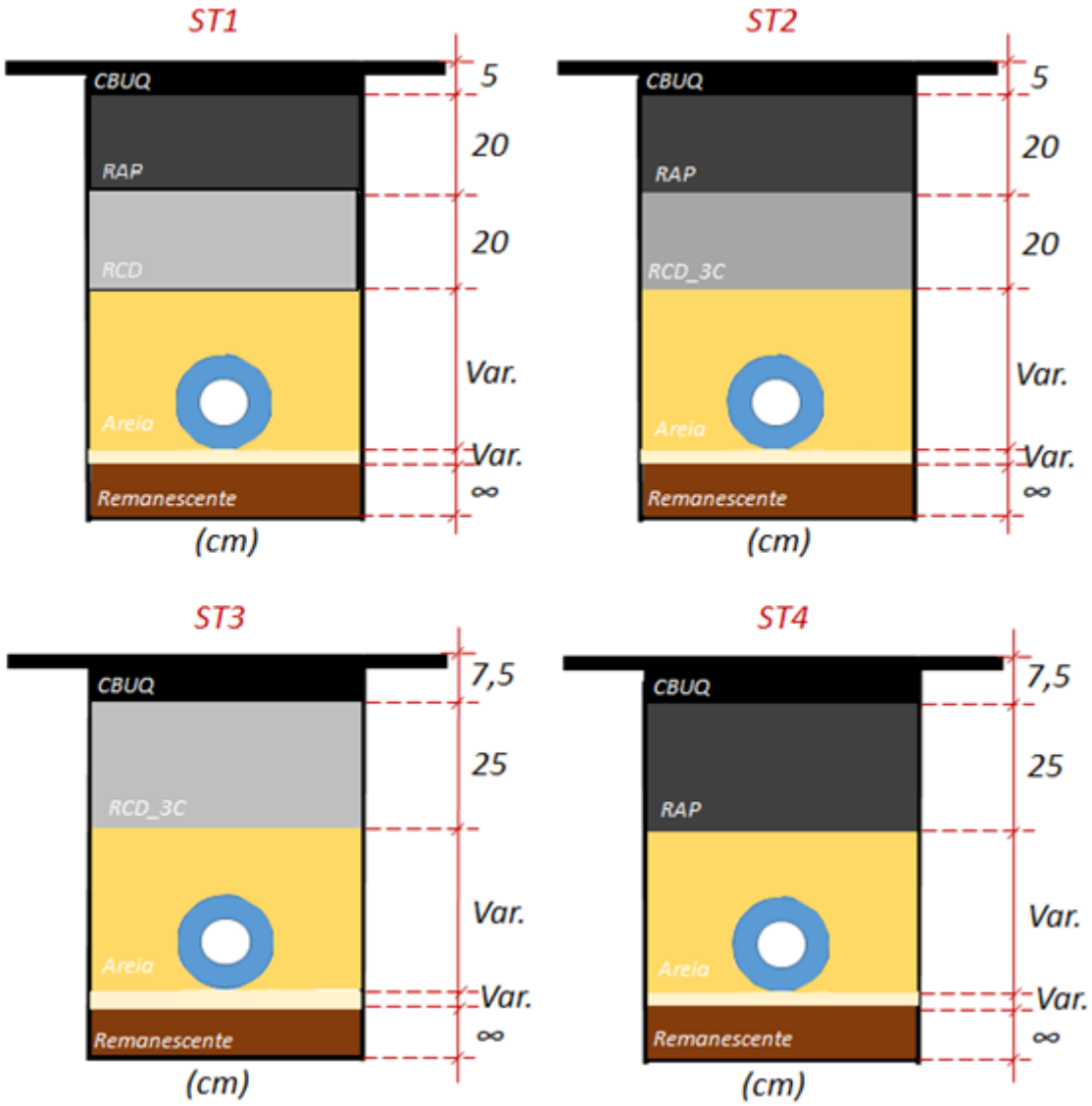


Tabela 35- Deflexão e tensões nas seções-tipo propostas

Seção-Tipo	Deflexão no topo do revestimento – Dadm ($10^{-2}mm$)	Tensão atuante no topo da camada de areia - admissível (kgf/cm²)
1	37	0,035
2	24	0,020
3	22	0,023
4	35	0,044

Em comparação com as seções tipo da PMSP (2018) e a SABESP (2014) as espessuras encontradas neste trabalho são maiores das apresentadas nos normativos supracitados. Uma justificativa seria porque partiu-se de uma espessura de camada de revestimento de valor igual a 10 cm, visto o fato do reaterro de valas ser realizado em pavimentos antigos, portanto sempre será mais de 5 cm de material asfáltico. Outro fator considerado foi que a deflexão de 70 x 10^{-2} mm foi o parâmetro utilizado para a intervenção na via, sendo por meio de reforço ou reparo estrutural e/ou funcionais, logo priorizou-se encontrar estruturas com deflexões menores que esta citada.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Neste capítulo são retratadas as conclusões desta dissertação e recomendações para pesquisas futuras

5.1 CONCLUSÕES

Uma série de dificuldades podem ser verificadas em obras de reaterro de valas, dentre elas o que se refere à qualidade dos materiais empregados (reaproveitamento de solos em condições inadequadas) e aos defeitos gerados, como recalques por deformação permanente. O uso de agregados reciclados como os de RCD e RAP pode ser uma alternativa para atender estas questões.

Durante o desenvolvimento da pesquisa observou-se alguma dificuldade em se encontrar normativos próprios para a caracterização de agregados reciclados para a aplicação em reaterro de valas no Brasil, o que eleva a importância desta pesquisa. A caracterização física e mecânica de maneira específica (voltadas a este tipo de emprego) proporciona maior entendimento sobre o comportamento dos materiais, melhor escolha de materiais e espessuras destes para os pavimentos e pode minimizar ou eliminar defeitos advindos de reaterro de valas, elevando a durabilidade.

Foram estudados três tipos de materiais: agregado reciclado de RCD, agregado reciclado com cimento Portland e agregado reciclado tipo RAP combinado a espuma de asfalto para produção de mistura asfáltica reciclada a frio.

Nesta pesquisa foram analisados dois parâmetros importantes relacionados ao comportamento mecânico de materiais voltados à pavimentação: módulo de resiliência e deformação permanente. Entende-se que os resultados aqui encontrados podem ser direcionados também à aplicação dos agregados reciclados em questão para obras de pavimentação contínua.

O agregado reciclado de RCD coletado para a pesquisa, com diâmetro máximo de 32 mm, se mostrou com graduação uniforme, o que pode ter levado à dificuldade de ensaio verificada no teste de módulo de resiliência (grande deformabilidade). Isto demonstra a necessidade de se atentar à questão da distribuição granulométrica deste tipo de material, uma vez que se observou ainda a grande variação desta ocorrida com a compactação (quebra que gerou curva menos uniforme) e melhor resultado nos ensaios de comportamento mecânico. Mesmo diante das especificações australiana (MRWA, 2013) e inglesa (SHW, 2016), voltadas à aplicação deste material em valas, não há consenso sobre a curva granulométrica a ser usada nesta situação. Diante deste cenário, optou-se por avaliar o agregado reciclado de RCD já nesta granulometria “melhorada” com a compactação em energia intermediária (diâmetro máximo 19 mm). A aplicação de maiores energias de compactação com agregados reciclados de RCD já foi apontada na literatura como fator a ser considerado.

No entanto, particularmente no caso de valas, entende-se que possa haver alguma dificuldade quanto à compactação em campo, em comparação com obras de pavimentos contínuos, pois a vala ocupa uma área pequena e os equipamentos utilizados para densificação podem não atuar de maneira eficiente. Dentro deste contexto, a simulação de compactação executada em laboratório pode não representar exatamente o que se consegue em campo.

Particularmente com relação à caracterização dos materiais de agregados reciclados de RCD, a análise de parâmetros como 10% de finos ou abrasão Los Angeles pode não ponderar corretamente o que se espera deste tipo de material, pela própria configuração de ensaio em relação ao campo.

De modo geral, notou-se que os materiais analisados apresentaram resultados compatíveis de módulo de resiliência com a literatura. A adição de 3% de cimento ao agregado reciclado de RCD com diâmetro máximo 19 mm elevou expressivamente a rigidez do material, bem como uniformizou as respostas com a elevação das cargas aplicadas. Este resultado é importante quando do interesse em se aplicar este tipo de material em estruturas de pavimento sujeitas a tráfego mais elevado.

Na mesma linha, o terceiro material estudado, o agregado reciclado de RAP, apresentou resultados compatíveis com a literatura, no que tange o módulo de resiliência.

Todos os três materiais estudados podem apresentar variação do comportamento mecânico em função do tempo de cura. Os agregados reciclados de RCD podem sofrer autocimentação, por causa do cimento anidrido não hidratado, a incorporação de cimento Portland eleva a rigidez com a cura deste e o RAP espumado também depende de cura para ter sua resistência e rigidez elevadas. Nesta pesquisa padronizou-se as avaliações em 7 dias de cura, mas acredita-se que os resultados encontrados ainda podem ser inferiores àqueles que poderiam ser alcançados por estes materiais, conforme observado por diversos autores na literatura. Ou seja, espera-se que a rigidez no pavimento se eleve ainda mais com o tempo. Neste caso, os resultados de módulo de resiliência encontrados com o agregado reciclado de RAP, por exemplo, podem vir a ser mais próximos dos valores encontrados com o agregado reciclado com cimento, considerando que provavelmente quase todo o ganho de rigidez com a cura já teria ocorrido após os 7 dias neste último material.

De maneira geral, os resultados de módulo de resiliência demonstraram que os agregados reciclados de RCD com cimento e os agregados reciclados de RAP com espuma de asfalto podem alcançar valores compatíveis com estruturas de pavimentos em que seriam feitas obras de valas.

Já com relação à deformação permanente, verificou-se que o agregado reciclado de RCD pode não ser capaz de suportá-la, mesmo sob menor relação de tensão-desvio x confinante. Neste caso, a incorporação de cimento foi extremamente benéfica, trazendo a deformação permanente para patamar menos elevado, inclusive em relações de tensões mais elevadas. Isto reforça o resultado encontrado no ensaio de módulo de resiliência, onde a adição do ligante hidráulico pode sugerir o uso deste material em pavimentos sujeitos a tráfego mais elevado.

A análise do comportamento considerando a teoria do *Shakedown* apontou a maior susceptibilidade do agregado reciclado de RCD ao *Shakedown*, chegando a Colapso Incremental. Porém, com a adição de cimento Portland, essa susceptibilidade foi reduzida, melhorando significativamente a resposta à deformação permanente.

Quanto às seções-tipo propostas nesta pesquisa, não foi possível estipular uma seção apenas com o agregado reciclado de RCD, devido às elevadas deflexões e altas tensões no topo da camada de areia. Entretanto, a combinação com camada de RAP, ou simplesmente a introdução de cimento àquele material tornou possível sua utilização como camada de preenchimento.

5.2 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

- Avaliar o comportamento mecânico de materiais autoadensáveis oriundos de agregado reciclado, que são tendência na aplicação como material de preenchimento a nível internacional;
- Avaliar o comportamento mecânico frente à compactação vibratória, para verificar o que ocorre no campo;

- Analisar a resistência ao cisalhamento dos agregados reciclados mediante ensaios de carga repetida;
- Construir e monitorar valas experimentais e aferir se os resultados obtidos correspondem ao comportamento analisado em laboratório, sendo feito por meio de fatores campo-laboratório, além de analisar o comportamento dos materiais frente ao tráfego real e variações sazonais;
- Realizar ensaios com o intuito de prever cargas e deflexões em dutos enterrados (flexíveis e rígidos), além do fenômeno de arqueamento;
- Realizar uma modelagem computacional com os dados obtidos com o campo e/ou laboratório, para aferir o comportamento solo-duto como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRELLA, F.; BARBUDO, A.; RAMÍREZ, A.; AYUSO, J.; CARVAJAL, M.D.; JIMÉNEZ, J. R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. **Resources**, **Conservation and Recycling**. v. 58, p. 98-106, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 2774**: standard practice for underground installation of thermoplastic pressure piping. 2012.

_____. **ASTM D 2321**: standard practice for underground installation of thermoplastic pipe for sewers and other gravity-flow applications. 2018.

ANDRADE, L. R. **Boas práticas para obras de reaterro de valas e recomposição de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2016. 140 p.

ARM, M. Self-cementing properties of crushed demolishing concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. **Waste Management.** v. 21, p. 235-239, 2000.

ARUDI, R.; PICKERING, B.; FLADING, J. Planning and implementation of a management system for utility cuts. **Transportation Research Record**. 2000. p. 42-48.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M.M.; BO, M.W. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 25. n. 8. p. 1077-1088, 2013.

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline**: Bitumen Stabilized Materials, A guideline for design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilized materials. Pretoria, South Africa, 2009. 148 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 5564**: via férrea – lastro ferroviário: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. 1° ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARISANGA, F. **Material characterisation and response modelling of recycled concrete and masonry in pavements**. Thesis (Master), Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2014. 211 p

BARKSDALE, R. D. **Repeated load test evaluation of base course materials**. Georgia Highway Department Research Project 002, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1972.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014. 219 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros**. 1° ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2006. 475 p.

BERTOLA, F.; BASSANI, M.; CANONICO, F.; BIANCHI, M. Use of rapid hardening cement for controlled low-strength materials for pavement applications. **Transportation Research Record**. Washington, n. 2363. p. 77-87, 2013.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. **Journal of Cleaner Production**. v. 18. p. 1021-1030, 2010.

BOTELHO, M. H. C. **Águas de chuva:** engenharia das águas pluviais nas cidades. 2º ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

BREDENKAMP, Z. **The performance properties of recycled concrete in road pavement materials**. Thesis (Master), Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2018. 234 p.

BUENO, B.; COSTA, Y. **Dutos enterrados:** aspectos geotécnicos. 2º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CARRERA, A. GRENFELL, J.; DAWSON, A.; PROCTOR, J. On site recycling of trench arisings for pavement reinstatement. In: Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010. **Anais**. Ancona: SCMT 2010.

CERNI, G.; CARDONE, F.; VIRGILI, A.; CAMILLI, S. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading. **Construction and Building Materials**. v. 28, p. 79-87, 2012.

CHAVES, P. A. (Org.) **Teoria e prática no tratamento de minérios:** manuseio de sólidos granulados. 2º ed v. 5. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHINI, A. R.; KUO, S.; ARMAGHANI, J. M.; DUXBURY, J. P. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. **Journal of Transportation Engineering**. Reston, Virginia, v. 127, n. 6, p. 486-492, 2001.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **NTS 164:** Ramal predial de água – diâmetro externo nominal de 20 e 32 mm em polietileno. São Paulo, 2016. 52 p.

_____. **Termo de Referência**. São Paulo, 2018. 5 p.

_____.**PO SO0088**: reaterro compactado e reposição de pavimento. São Paulo, 2014. 8 p.

DAN BEN, M. **Resilient response and performance of bitumen stabilized materials with foam incorporating reclaimed asphalt**. Thesis (Doctor), Stellenbosch University, 2014. 375 p.

DARONCHO, C.; LOPES, H. N. Análise dos serviços de recomposição da pavimentação das vias urbanas de São Paulo em decorrência da abertura de valas. In: 14º Reunião de Pavimentação Urbana, 2007. **Anais**. Ribeirão Preto, 2007.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8° ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 612 p.

DELONGUI, L. **Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 244 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER ME 96**: agregado graúdo - avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos. Rio de Janeiro, 1998a.

_____. **DNER ME 35**: agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998b.

_____. **DNER ME 81**: agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998c.

_____. **DNER ME 83**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT ME 134**: pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. 2018. 18 p.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND LOCAL GOVERNMENT (GELB). **Guidelines for the opening, backfilling and reinstatement of trenches in public roads.** Ireland. 2002. 94 p.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecanística de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.193 p.

FORTES, R. M.; ZUPPOLINI NETO, A.; MENETTI, N. C.; BARBOSA, A. S.; MERIGHI, C. F. Importância do controle tecnológico e de qualidade na reabilitação de pavimentos após a intervenção de concessionárias em São Paulo. In: 36º Reunião Anual de Pavimentação, 2005. **Anais**. Curitiba, 2005.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Wiley, New York, 1993.

FU, P.; JONES, D.; HARVEY, J. T.; HALLES, F. A. Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 22. n. 1, p. 29-38, 2010.

GARCEZ, A. C. **Contribuição para melhoria do desempenho dos pavimentos urbanos através do controle de qualidade do reaterro de valas de serviços concessionados.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2010, 228 p.

GHATAORA, G. S.; ALOBAIDI, I.; FARAGHER, E.; GRANT. S. Use of recycled aggregates for cementitious backfill. **Waste and Resource Management**. v. 159 p. 23-28. 2006.

GODOY E VASCONCELLOS, J. L. **Valas***:* abertura, escoramento provisório e esgotamento d'água. Ed. Baraúna. São Paulo, 2013. 103 p.

GÓMEZ, A. M. J. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, 2011. 185 p.

_____. **Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamento cíclicos**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, 2016. 185 p.

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

GUATIMOSIM, F. **Mechanical behavior and structural performance of recycled foamed bitumen stabilized materials**. Dissertação (Mestrado).

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2015. 109 p

GUIMARÃES, A. C. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 367 p.

HILL, A. R.; DAWSON, A. R.; MUNDY, M. Utilization of aggregate materials in road construction and bulk fill. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 32, n. 34, p. 305-320, 2001.

HOWARD, A. K. **Pipe bedding and backfill**. Geotechnical training manual. n° 7, 2 ed, Denver, Colorado. 1996. 88 p.

HOWARD, A. K.; HITCH, J. L. **The design and application of controlled low-strength materials** (flowable fill). Series: ASTM special technical publication, 1998. 338 p.

HVEEM, F. N.; Pavement deflection and fatigue failures. **Bulletin n° 114**. HRB (TRB). Washington, D.C., 1955. p. 43-87.

IZIDORO, M. Uso de areia reciclada de resíduos de construção civil em envoltórias de redes de água e esgoto. In: 29° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017. **Anais**. São Paulo: 29° Congresso ABES 2017.

JONES, D., FU, P., HARVEY, J. T.; HALLES, F. A. Full-depth recycling with foamed asphalt: Final report. **Rep. No. UCPRC-RR- 2008–07**, University of California Pavement Research Center, 2008.

KIM, Y.; IM, S.; LEE, H. D. Impacts of curing time and moisture content on engineering properties of cold in-place recycling mixtures using foamed or emulsified asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 23. n. 5, p. 542-553, 2011.

KUCHIISHI, A. K.; ANTÃO, C. C. S.; VASCONCELOS, K. L.; PIRES, J. J.; ARAÚJO, O. M. O.; BERNUCCI, L. L. B.; LOPES, R. T. Investigation of the matric suction role on the curing mechanism of foamed asphalt stabilized mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. v. 20, p. 365-389, 2019.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics:** SI Version. New York: John Wiley & Sons, 1979. 553 p.

LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T. Implementation of cold in-place recycling with expanded asphalt technology in Canada. **Transportation Research Record**. v. 1905, p. 17–24, 2005.

LE, H. M. T.; PARK, D. W.; SEO, J. W.; SEO, W. J. Trench backfill material using plant coal ash. In: World of Coal Ash, 2017. **Anais**. Lexington: WOCA 2017.

LEE, K. J.; KIM, A. K.; LEE, K. L. Flowable backfill materials from bottom ash for underground pipeline. **Materials**. v. 7 p. 3337-3352, 2014.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 185 p.

LEKARP, F.; DAWSON, A. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. **Construction and Building Materials**. v. 12, n. 1, p. 9-18, 1998.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the Art – II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. American Society of Civil Engineers (ASCE) **Journal of Transportation Engineering**. v. 126, n. 1, p. 76 -83. 2000.

LENTZ, R. W.; BALADI, G. Y. Constitutive equation for permanent strain of sand subjected to cyclic loading. **Transportation Research Record**. Washington, n. 810. p. 50-54, 1980.

LIM, S.; KESTNER, D.; ZOLLINGER, D. G.; FOWLER, D. W. Characterization of crushed concrete materials for paving and non-paving applications. **Report n° TX-04/7-4954-1**. 2001, 178 p.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. Study of Permanent Deformation and Granulometric distribution of Graded Crushed Stone Pavement. **Procedia Engineering**. v. 143, p. 854-861, 2016.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente de britas granito-gnaisse para uso em base e sub-base de pavimentos. **Transportes**. v. 25, n. 2, p. 41-52, 2017.

LING, T. C.; KALIYAVARADHAN, S. K.; POON, C. S. Global perspective on application of controlled low strength material (CLSM) for trench backfilling – an overview. **Construction and Building Materials**. v. 158. p. 535-548, 2018.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009. 350 p.

MARQUIS, B.; BRADBURY, R. L.; COLSON, S.; MALICK, R. B.; NANAGIRI, Y. V.; GOULD, J. S.; O'BRIEN, S.; MARSHALL, M. Design, construction and early performance of foamed asphalt full depth reclaimed (FDR) pavement in Maine. In: 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.

MATUELLA, M. F.; DELONGUI, L.; NÚÑEZ, W. P.; SILVA FILHO, L. C. P. Potencialidade de resíduos de construção e demolição como material alternativo sustentável para construção de pavimentos. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, 2015. **Anais**. Lisboa: CONPAT 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3° ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 638 p.

MELBOURNE RETAIL WATER AGENCIES (MRWA). **Specification 04-03.2:** Backfill Specification. Melbourne, 2013. 34 p.

MONISMITH, C. L.; OGAWA, N.; FREEME, C. R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated load. **Transportation Research Record**, Washington, n. 537, p. 1-17, 1975.

MOLENAAR, A. A. A.; VAN NIEKERK, A. A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. **Transportation Research Record**. v. 2418, n. 02. p. 73-82, 2002.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005, 135 p.

NOHL, J. P. E.; DOMNICK, R. **Stockpile segregation superior industries**. Superior Industries, 2001.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). **Excavations: hazard recognition in trenching and shoring**. Section V, chapter 2, 2014.

O'MAHONY, M. M.; MILLIGAN, G. W. E. Use of recycled materials in subbase layers. **Transportation Research Record**. Washington, n. 1310. p. 73-80, 1991.

PAIGE-GREEN, P. A preliminary evaluation of the reuse of cementitious materials. In: Annual Southern African Transport Conference. Pretoria, 2010. p. 520-529.

POON, C.S.; CHAN, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**. v. 20, n. 8, p. 578-585, 2006.

POON, C. S.; QIAO, X. C.; CHAN, D. The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. **Waste Management**. v. 26, p. 1166-1172, 2006.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (PMSP). **ETS 001**: camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003. 14 p.

_____. IR 01: instrução de reparação de pavimentos flexíveis danificados por abertura de valas. São Paulo, 2018. 14 p.

PUPPALA, A. J.; MOHAMMAD, L. N.; ALLEN, A. Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 11. n. 4. p. 274-282, 1999.

RAHMAN, M. A.; IMTEAZ, M.; ARULRAJAH, A.; DISFANI, M. M. Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. **Journal of Cleaner Production**. v. 66, 2014. p. 75-84.

REID, J. M. **The use of alternative materials in road construction**. UNBARS Conference. United Kingdom, 2000.

RUCKEL, P. J.; ACOTT, S. M.; BOWERING, R. H. Foamed Asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens. **Transportation Research Record**. v. 991, n. 13, p. 88-95, 1982.

SCHAEFER, V.; SULEIMAN, M.; WRITE, D.; SWAN, C.; JENSEN, K. **Utility cut repair techniques**: investigation of improved cut repair techniques to reduce settlement in repaired areas. Iowa State University, Iowa. 2005.

SEATTLE TRANSPORTATION. **Impact of utility cuts on performance of Seattle streets**. Final Report. Seattle, Washington. 2000. 56 p.

SHARP, R. W.; BOOKER, J. R. Shakedown of pavements under moving surface loads. **Journal of Transportation Engineering**. v. 110, n. 1, p. 1-14, 1984.

SILVA, P. B. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos de vias**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014. 172 p.

SPECIFICATION FOR HIGHWAY WORKS (SHW). **Series 800:** road pavements - unbound, cement and other hydraulically bound mixtures. England, 2016.

STATEWIDE URBAN DESIGN AND SPECIFICATIONS (SUDAS). **Division 3 - Trench and trenchless construction**. Section 3010 - Trench excavation and backfill. 2011. 12 p.

STOLLE, D.; GUO, P.; LIU, Y. Resilient modulus properties of granular highway materials. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v. 36, n° 4, p. 639-654, 2009.

STUCHI, E. T. **Interferências de obras de sérvio de água e esgoto sobre o desempenho de pavimentos urbanos.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005, 95 p.

TAM, V.W.Y. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. **Journal of Cleaner Production**. v. 17. p. 688-702, 2009.

TERZI, N. U.; ERENSON, C.; SELÇUK, M. E. Geotechnical properties of tire sand mixtures as backfill material for buried pipe installations. **Geomechanics and Engineering**. v. 9, n. 4, 2015.

THEYSE, H. L. **A mechanistic-empirical design model for unbounds granular pavement layers**. Thesis (Doctor Ingeneriae) Faculty of Engineering and the Built Environment of University of Johannesburg, 2007. 338 p.

TSENG, E. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. 220 p.

TYSL, S.; NOLL, J. **Practical considerations related to the use of alternative backfill materials for flexible soil-interaction structure installation**. 2011. 8 p.

VAN NIEKERK, A. A. Mechanical behaviour and performance of granular bases and sub-bases in pavements. Dissertation (Doctor), Delft University of Technology, 2002. 561 p.

VEDRONI, W. J.; **Estudo de caso sobre a utilização do RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos de Piracicaba, SP.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2007, 181 p.

VICROADS. **Standard specifications for roads works and bridge works.** Section 702 - Subsurface drainage, 2006.

WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME (WRAP). Recycled and stabilised materials in trench reinstatement. **WAS005-002**: Final Report, 2007. 33 p.

WEIDLICH, I.; GRAJCAR, M. Expected potential of bound and recycled backfill material in low temperature district heating networks. In: International Scientific Conference Environment and Climate Technologies, 2017. **Anais**. Riga: CONECT 2017.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the *Shakedown* concept. **Transportation Research Record** n. 1757, p. 75 -81. 2001.

WERKMEISTER, S. **Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions**. Thesis (Docktor-Ingenieurs). Technischen Universität Dresden, 2003. 189 p.

WIDGER, A.; SKILNICK, F.; ZABOLOTNII, E. **Utilization of recycled asphalt in cold mixes and cold in-place recycling processes guidelines**. 2012. 48 p.

WIDGER, A.; ZABOLOTNII, E. **Guidelines for improved trench reinstatement programs and work practices**. 2013. 50 p.

WIRTGEN. **Cold recycling: Wirtgen cold recycling technology**. 2012. 370 p.

XUAN, D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A. SHUI, Z. H. Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review. **Materials and Design**. v. 33, p. 496-502, 2012.

ZHAN, C.; RAJANI, B. Load transfer analyses of buried pipe in different backfills. **Journal of Transportation Engineering**. v. 123, n. 6, p. 447-453, 1997.