

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Stephania Spiondorello Ferreira

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO ALTERNATIVA
DE ESTRUTURA NO PAVIMENTO DA AV. JUSCELINO
KUBITSCHEK – PELOTAS/RS**

Porto Alegre

Julho 2017

STEPHANIA SPIONDORELLO FERREIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO ALTERNATIVA
DE ESTRUTURA NO PAVIMENTO DA AV. JUSCELINO
KUBITSCHEK – PELOTAS/RS**

Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientador: Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Coorientador: Engº M.e. Matheus Matuella

Porto Alegre

Julho 2017

STEPHANIA SPIONDORELLO FERREIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO ALTERNATIVA
DE ESTRUTURA NO PAVIMENTO DA AV. JUSCELINO
KUBITSCHK – PELOTAS/RS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador Washington Peres Núñez da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Julho de 2017

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Doutor pela UFRGS
Orientador

Mestre Eng^o Matheus Matuella
Mestre pela UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. Luis Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College de Londres
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Doutor pela UFRGS

Mestre Eng^o Matheus Matuella
Mestre pela UFRGS

Prof. Dr. Luis Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College de Londres

Prof. Dr. Lucas Delongui
Doutor pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais e irmã, Rejane, José Antônio e Fernanda, que sempre me apoiaram na vida e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Professor Dr. Washington pela oportunidade de desenvolver este trabalho, o qual auxiliou na realização deste estudo e possibilitou a utilização dos equipamentos do laboratório de pavimentação (LAPAV) e do laboratório de geotecnologia (LAGEOTEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço, também, ao M.Sc. Matheus Matuella, pelo tempo dedicado aos esclarecimentos das minhas dúvidas, pela paciência e pelos ensinamentos.

Em especial, agradeço à minha família, pelo amor a mim sempre dado e pelo apoio durante esta jornada.

Ao meu querido namorado Eduardo, pela paciência, apoio, amor e companhia em todos os dias.

Por fim, um agradecimento a todos amigos e colegas de curso, em especial à Emilly e Jacqueline, que, diretamente e/ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no
dicionário.

Albert Einstein

RESUMO

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são popularmente conhecidos por entulho e tecnicamente definidos como todos resíduos de materiais oriundos da construção civil. Quando gerenciado de forma inadequada, os RCD são responsáveis por deposições ilegais tanto no Brasil como no exterior. Com a reciclagem deste material é possível obter, além de certa diminuição de custos, a redução dos passivos ambientais que os resíduos geram nas cidades. Até então, estudos envolvendo estes materiais voltados para a pavimentação vêm sendo desenvolvidos, observando suas propriedades físicas e mecânicas, mostrando que demonstram um bom desempenho quando utilizados em camadas de um pavimento. Em 2002 foi lançada a resolução CONAMA nº 307, a qual classifica os RCD em quatro classes, de acordo com sua periculosidade. Em 2004, com a intenção de regulamentar o emprego dos RCD, foram elaboradas pela ABNT as normas NBR 15115/2004 e NBR 15116/2004, exigindo ensaios e parâmetros mínimos para a utilização em pavimentação. A partir de ensaios de granulometria, compactação, compressão monotônica e módulo de resiliência, um dos objetivos deste trabalho foi de analisar os parâmetros físicos e mecânicos dos RCD, de modo a se verificar a possível utilização deste em camadas de base de pavimentos, em substituição dos materiais que convencionalmente são empregados (geralmente brita). Outro objetivo proposto foi de verificar se as características deste tipo de agregados permitiriam, hipoteticamente, sua utilização em uma obra na Av. Juscelino Kubitschek, em Pelotas/RS. Vale ressaltar que alguns dados foram obtidos através da consulta de estudos anteriores, facilitando assim a análise em questão. Assim, de posse dos resultados de ensaios, foram realizadas análises mecânicas com o auxílio do programa Everstress 5.0, calculando-se respostas estruturais para estruturas de pavimento: uma com base em RCD e a outra, pela solução proposta no projeto original, com base em brita graduada (BGS). Estas duas estruturas foram comparadas de forma a se avaliar o desempenho frente a diferentes mecanismos de degradação do pavimento, empregando-se modelos incluídos no Método de Dimensionamento Mecânico-empírico da República da África do Sul (SAMDM – *South African Mechanistic Design Method*). De um modo geral, a estrutura com base em RCD se comportou de maneira satisfatória, indicando que é possível aliar um bom desempenho estrutural a questões ambientais e, conseqüentemente a ganhos econômicos.

Palavras-chave: Resíduo de Construção e Demolição. Pavimentação. Utilização de RCD em Camadas de Pavimentos. Dimensionamento Mecânico da República da África do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de pesquisa	14
Figura 2 – Estrutura típica de um pavimento	18
Figura 3 – Localização da Avenida Juscelino Kubistchek	19
Figura 4 – Representação do pavimento existente	20
Figura 5 – Localização da Rua General Osório	22
Figura 6 – Demonstração do cálculo da estrutura do pavimento de projeto	23
Figura 7 – Ilustração do pavimento indicado em projeto	24
Figura 8 – Definição de Parâmetros de Resistencia por Mohr-Coulomb	34
Figura 9 – Passagem pela peneira número 4 indicada pela norma	36
Figura 10 – Moldagem em camadas	37
Figura 11 – Câmara de ensaio triaxial.....	37
Figura 12 – Distribuição granulométrica dos RCD x Faixa A	40
Figura 13 – Deformação Horizontal	45
Figura 14 – Resposta estrutural crítica e Localização para Camadas Granulares	48
Figura 15 – Parâmetro Crítico e tensão no topo da camada de subleito.....	50
Figura 16 – Ruptura do corpo de Prova	52
Figura 17 – Corpo de prova rompido.....	52
Figura 18 – Atuação da carga no pavimento com eixo simples e duplo	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de equivalência - Método DNER.....	23
Tabela 2 – Requisitos Gerais.....	27
Tabela 3 – Requisitos Específicos.....	27
Tabela 4 – Faixas Granulométricas - especificadas pelo DNIT	31
Tabela 5 – Parâmetros α , β	37
Tabela 6 – Parâmetros α e β	39
Tabela 7 – Classes dos materiais.....	40
Tabela 8 – Parâmetro Crítico e Localização para Camadas Granulares.....	41
Tabela 9 – Tensões indicadas pela Norma - Fase de condicionamento	46
Tabela 10 – Tensões Fase Condicionamento – Aplicadas	46
Tabela 11 – Parâmetros do solo do Subleito	48
Tabela 12 – Comparação de parametros dos RCD exigidos pela Norma 15116.....	49
Tabela 13 – Parâmetros obtidos RCD	50
Tabela 14 – Coesão e ângulo de atrito apresentados pelos RCD	50
Tabela 15 – Parâmetros obtidos BGS	51
Tabela 16 – Coesão e ângulo de atrito – BGS.....	51
Tabela 17 – Resumo N obtido.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento resiliente do material de Subleito	51
Gráfico 2 – Análise da fadiga do revestimento asfáltico – espessura CA = 5cm	56
Gráfico 3 – Análise da fadiga do revestimento asfáltico – espessura CA = 10cm	56
Gráfico 4 – Análise do cisalhamento da camada granular – base – espessura CA = 5cm.....	57
Gráfico 5 – Análise do cisalhamento da camada granular – base – espessura CA = 10cm.....	58
Gráfico 8 – Análise da tensão no topo do subleito – espessura CA = 5cm	59
Gráfico 9 – Análise da tensão no topo do subleito – espessura CA = 10 cm	59
Gráfico 10– Análise geral do desempenho do pavimento – BGS – CA espessura = 5 cm.....	60
Gráfico 11– Análise geral do desempenho do pavimento – BGS – CA espessura = 10 cm.....	61
Gráfico 12 – Análise geral do desempenho do pavimento – RCD – CA espessura = 5 cm	61
Gráfico 13 – Análise geral do desempenho do pavimento – RCD – CA espessura = 10 cm	62

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional de Petróleo

BGS – Brita Graduada Simples

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Concreto Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Normativa Brasileira

RCD – Resíduo da Construção e Demolição

SAMDM – South African Mechanistic Design Method

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ – Ângulo de atrito (°)

Φ_{term} – Valores de ângulo de atrito interno (°)

α, β – Parâmetros de modelo

a – Constante conforme Tabela 8

c – Coesão (kPa)

C_{term} – Valores de coesão indicados por grupo de material (kPa)

ε_t – Deformação horizontal na fibra inferior da camada

ε_v – Compressão vertical no topo da camada;

F – Relação de tensões

K – Constante de acordo com a umidade

K_R – Coeficiente de equivalência para o revestimento

K_B – Coeficiente de equivalência para a base

K_{BS} – Coeficiente de equivalência para a sub-base

N – Número de passagens de eixo padrão contrarruptura por cisalhamento

N_f – Número de passagens de eixo padrão até o início do trincamento por fadiga;

N_{PD} – Número de passagens do eixo padrão para causar deformação permanente;

σ_1, σ_3 – Maior e menor tensões principais no interior da camada (kPa)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	12
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivo específico.....	12
1.3 DELINEAMENTO.....	12
1.4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA.....	14
2. PAVIMENTAÇÃO.....	16
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	16
2.1.1 Pavimentos Rígidos.....	16
2.1.2 Pavimentos Semirrígidos.....	16
2.1.3 Pavimentos flexíveis.....	17
2.2 ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO.....	17
2.2.1 Subleito.....	17
2.2.2 Reforço do Subleito.....	17
2.2.3 Sub-base.....	18
2.2.4 Base.....	18
2.2.5 Revestimento.....	18
3. PROJETO ORIGINAL DE PAVIMENTAÇÃO DA AVENIDA JUSCELINO KUBISTCHEK – PELOTAS/RS	19
3.1 LOCAL DE APLICAÇÃO DO ESTUDO.....	19
3.2 PREMISSAS DE PROJETO.....	20
3.2.1 Dados de Tráfego.....	20
3.2.2 Período de projeto.....	22
3.2.3 Materiais escolhidos.....	22
3.3 DEFINIÇÕES E MÉTODOS.....	22
3.4 PAVIMENTO PROJETADO.....	24
4. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	25
4.1 USO DOS RCD.....	25
4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RCD.....	26
4.3 NORMATIZAÇÃO.....	26
4.4 PESQUISAS AFINS REALIZADAS NO LAPAV – UFRGS.....	28
5. METODOLOGIA.....	30
5.1 ENSAIOS LABORATORIAIS.....	30

5.1.1 Ensaio de Caracterização.....	30
5.1.1.1 Granulometria.....	30
5.1.1.2 Compactação.....	31
5.1.2 Ensaio de resistência mecânica e de deformabilidade elástica.....	32
5.1.2.1 Módulo de Resiliência.....	32
5.1.2.2 Resistência ao cisalhamento na compressão triaxial.....	34
5.1.2.3 Carregamento monotônico.....	35
5.2 PARÂMETROS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	36
5.2.1 Parâmetros físicos e mecânicos do solo do subleito local.....	36
5.2.2 Parâmetros físicos e mecânicos dos RCD.....	39
5.2.2.1 Análise Granulométrica.....	39
5.2.2.2 Módulo de resiliência.....	41
5.2.3 Parâmetros físicos e mecânicos da BGS.....	42
5.2.4 Parâmetros físicos e mecânicos do macadame.....	42
5.3 ANÁLISE DO ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	43
5.3.1 Software Everstress 5.0.....	43
5.3.2 Método de Dimensionamento Mecânico da Republica da África do Sul (South African Mechanistic Design Method).....	44
5.3.2.1 Análise de fadiga em mistura asfáltica.....	44
5.3.2.2 Análise da segurança da base granular contra rupturas por cisalhamento.....	46
5.3.3.3 Análise das deformações permanentes no topo do subleito.....	49
6. RESULTADO DO ENSAIO DO SOLO DO SUBLEITO.....	51
7. AVALIAÇÃO EMPÍRICO-MECANÍSTICA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS	54
7.1 ANÁLISE DE TENSÕES.....	54
7.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS.....	54
7.2.1 Análise de fadiga em misturas asfálticas.....	55
7.2.2 Análise por deformação permanente em camada granular.....	57
7.2.3 Análise de deformações verticais no topo do subleito.....	58
7.3 DESEMPENHO GERAL DOS PAVIMENTOS PROJETADOS.....	60
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

As construções civis representam um papel significativo no crescimento de qualquer sociedade. Desta forma, todo desenvolvimento necessita que se tenha à disposição do empreendimento um grande volume de matéria-prima e, assim, por vezes, acaba-se explorando os recursos de forma irresponsável. A sociedade vive hoje um momento no qual existe a necessidade eminente de construir mais sustentavelmente, caso contrário futuramente haverá falta de matéria-prima para continuidade das obras. Atualmente, a preocupação com impactos ambientais está vinculada, entre outras coisas, ao excessivo ou ineficiente consumo de recursos naturais (LEITE, 2007).

Junto a isto, segundo os índices de reajustes publicados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), entre agosto de 2015 e agosto de 2016, houve um aumento de mais de 35% em um dos principais insumos necessários para a construção das vias, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Assim, a necessidade de se pensar em outros métodos de construção para a área de infraestrutura rodoviária se torna ainda mais pertinente, de modo a se ter uma minimização no custo final das obras através da simples substituição de materiais, com igual capacidade técnica.

Para reduzir custos e viabilizar a construção e manutenção de vias urbanas, seja por reaproveitamento de estruturas existentes ou pela utilização de materiais locais e/ou alternativos como os resíduos de construção/demolição (RCD), torna-se necessário que haja um estudo para avaliar se os materiais são passíveis de serem utilizados para determinado fim (DELONGUI, 2016).

Além de reduzir gastos com aterros e materiais de construções para pavimentos, a melhor destinação dos RCD propicia um aumento da vida útil dos depósitos legalizados, visto a minimização deste descarte, e também, diminuição das descargas clandestinas ao longo de terrenos abandonados e vias públicas; conseqüentemente minorando os gastos com remoção de resíduos por parte dos órgãos públicos e também melhorando o aspecto visual das cidades (TRICHÊS e KRYCKYJ, 1999). Neste íterim, a alternativa de construção de camadas de pavimentos utilizando os resíduos de construção e demolição é uma oportunidade para garantir uma construção mais sustentável e mais econômica.

Os RCD, popularmente conhecidos por calça ou entulho, são definidos, de acordo com a Resolução CONAMA Nº 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) como:

[...] os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

A preocupação ambiental, referente à incorreta destinação deste material, tem grande relevância, visto que, segundo a Prefeitura do Município de São Paulo, calcula-se que sejam geradas aproximadamente 16 milhões de toneladas de resíduo de construção, resultando numa geração de 0,50 toneladas por habitante por ano (SCHNEIDER, 2003).

Além de dar destino ao material indesejado de outras construções, a pavimentação tem potencial de absorver grandes volumes e possibilita o uso da maioria dos materiais constituintes do entulho, sendo, então, uma ótima opção para aliviar os impactos ambientais gerados por descartes deste resíduo em aterros comuns.

Diante destas análises e destes fatos, este trabalho visou comparar duas soluções para as camadas de um pavimento que está sendo construído no município de Pelotas/RS, localizado na Av. Juscelino Kubitschek, tal pavimento originalmente foi dimensionado considerando o emprego de brita graduada simples (BGS) na camada de base. Assim, visando atender às instituições responsáveis pela contratação de obras da possibilidade de utilização de materiais de mesma capacidade e de menor custo, foram dimensionadas estruturas com a utilização de RCD para a obra supracitada, em substituição à BGS na base do pavimento.

Vale reiterar que este trabalho tem a intenção de propor uma análise sobre a possível utilização de RCD em camadas de pavimentos, quando comparado com estruturas de BGS, como é o caso da avenida em estudo. Os RCD utilizados são provenientes do município de Porto Alegre, e já se encontra em estudo paralelo no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da UFRGS. Também, deve-se enfatizar que a Avenida escolhida para comparativo se situa no município de Pelotas/RS e foi escolhida em razão do acesso aos dados. Portanto, o objetivo é fomentar o estudo para utilização de resíduos em obras futuras que possam ter soluções semelhantes às aqui evidenciadas e exaltar os possíveis ganhos ambientais e econômicos para a região.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão da pesquisa do trabalho é: analisando os parâmetros mecânicos do RCD é possível utilizá-lo como camada de base na pavimentação da Av. Juscelino Kubistchek – Pelotas/RS, propondo assim um melhor debate para soluções em obras futuras do entorno?

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se avaliar a viabilidade de utilização do material RCD como camada estrutural para o pavimento da Av. Juscelino Kubistchek – Pelotas/RS.

1.2.2 Objetivo específico

Uma vez que estudos previamente realizados permitem considerar que os RCD apresentam parâmetros mecânicos adequados para a sua utilização na pavimentação, teve-se-a como objetivo específico realizar o dimensionamento de pavimentos, incluindo esses materiais na base. Objetivou-se, igualmente, comparar os comportamentos do pavimento com RCD e do indicado em projeto com a utilização de BGS.

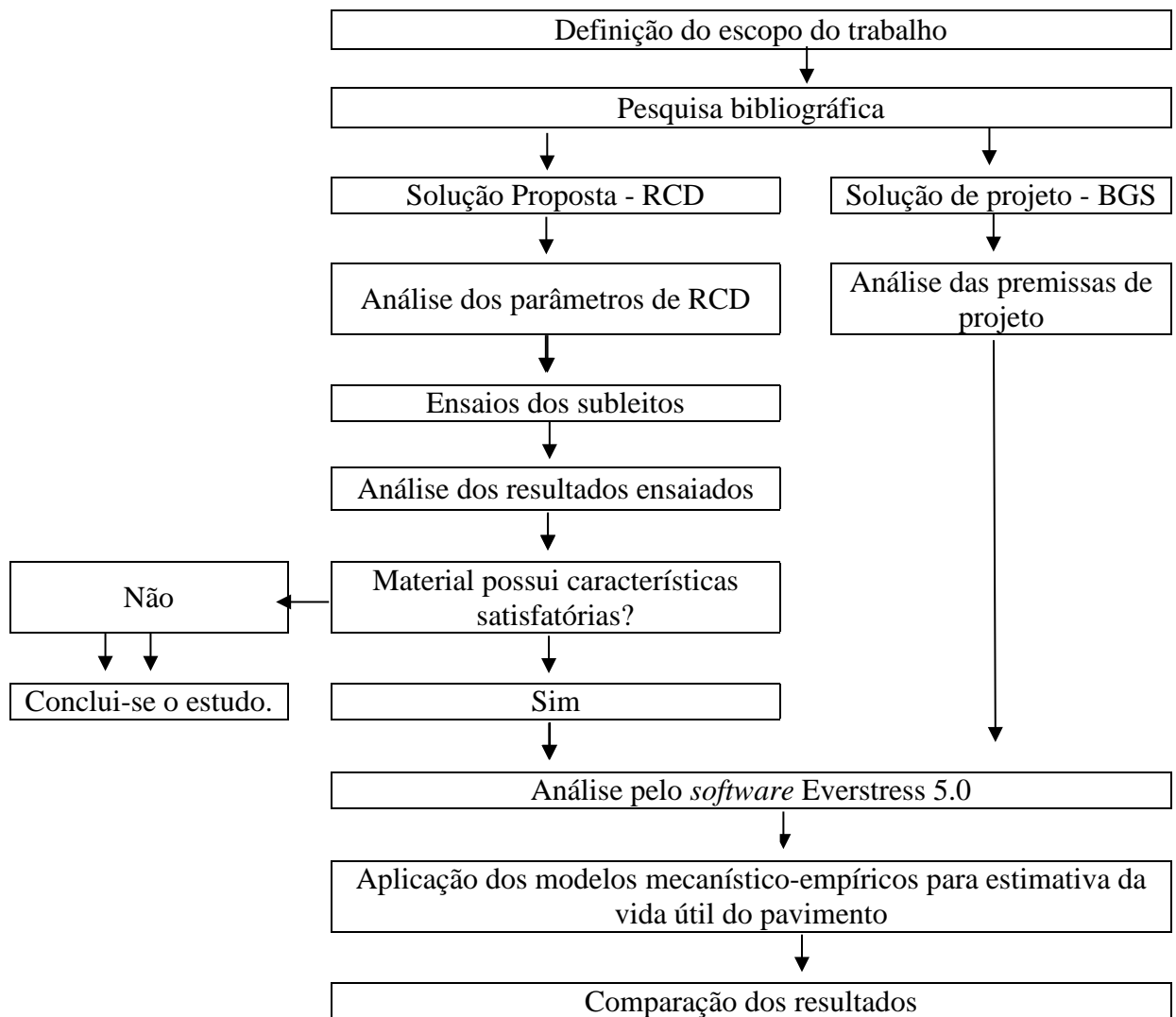
1.3 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado seguindo as etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1:

- a) definição do escopo do trabalho;
- b) pesquisa bibliográfica;
- c) verificação das propriedades mecânicas dos RCD, de acordo com as normativas vigentes;
- d) realização de ensaios do subleito local;
- e) análise dos resultados dos ensaios;

- f) análise computacional com o *software* Everstress;
- g) aplicação dos modelos mecanístico-empíricos para a estimativa de vida útil;
- h) análise dos resultados obtidos;
- i) conclusão.

Figura 1 - Etapas de pesquisa



(Fonte: elaborado pela autora)

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa bibliográfica tem por objetivo proporcionar um embasamento teórico para o desenvolvimento de todo o assunto abordado. É importante, também, para aprofundar o conhecimento das normativas vigentes e trabalhos já propostos anteriormente sobre o tema.

Para analisar as características físicas e comportamentos mecânicos do material RCD, utilizaram-se valores obtidos em ensaios já realizados anteriormente nos Laboratórios de Pavimentação (LPAV), Geotecnologia (LAGEOtec) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e no laboratório locado na obra em estudo. Os ensaios em amostras do solo de subleito

local foram realizados pela autora e, desta forma, foram conhecidas as características necessárias dos materiais para o desenvolvimento do estudo proposto.

Os valores de módulo de resiliência do concreto asfáltico, da brita graduada simples (BGS) e do macadame foram obtidos em estudos de pavimentos executados e disponíveis na bibliografia.

De posse dos parâmetros de entrada para o *software* Everstress 5.0, o que permite calcular tensões, deformações e deslocamentos (deflexões), foram feitas as análises de comportamento do pavimento com RCD e BGS em camada de base.

Com base nos parâmetros dos materiais e resultados obtidos através da análise com o Everstress, foram aplicados modelos incluídos no Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico da África do Sul, para previsão da vida útil de cada pavimento.

Finalmente, com base nas análises anteriores chegou-se às conclusões deste trabalho.

2. PAVIMENTAÇÃO

As diferentes camadas que compõe um pavimento são as responsáveis por absorver e destinar ao subleito todas as tensões sofridas através do tráfego recebido. Para Balbo (2007), a estrutura completa de um pavimento é concebida no sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, sendo assim, cada camada do pavimento deve proporcionar aos usuários das rodovias condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.

O pavimento é uma estrutura constituída de diversas camadas, portanto encontram-se várias dificuldades em encontrar um único termo que consiga definir toda a estrutura (SENÇO, 2007).

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Segundo o Manual de Pavimentação Rodoviária do DNIT (2006), podemos definir os pavimentos em três tipos, variando conforme a composição das suas camadas. São elas:

2.1.1 Pavimentos Rígidos

O pavimento rígido é aquele que possui uma elevada rigidez em relação as suas camadas inferiores. Absorve, portanto, praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

2.1.2 Pavimentos Semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos são aqueles caracterizados por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias e com revestimento de característica flexível, como é o caso do revestimento asfáltico.

2.1.3 Pavimentos flexíveis

É aquele em que todas as camadas que o compõem sofrem uma deformação elástica significativa após o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribuirá em parcelas aproximadamente equivalentes a resistência de cada material.

Segundo o que consta no Manual de Pavimentação Rodoviária do DNIT (2006), pavimento é uma estrutura destinada para distribuir ao subleito os esforços verticais oferecidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento para os usuários, bem como resistir aos esforços horizontais (desgastes).

Sendo assim, divide-se o pavimento em 5 camadas principais apresentadas a seguir, e exemplificadas na figura 2.

2.2 ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO

2.2.1 Subleito

Os esforços impostos sobre a superfície do subleito serão aliviados em sua profundidade (normalmente se distribui ao longo do primeiro metro); deve-se, portanto, ter maior preocupação com seus estratos superiores, onde as tensões oferecidas atuarão com maior magnitude (BALBO, 2007).

2.2.2 Reforço do Subleito

Segundo Pinto (1999) o reforço do subleito é uma camada de espessura constante, executada sobre o subleito/regularização, geralmente com materiais de características superiores aos da camada abaixo e inferiores à da camada acima, para assim, ter uma maior capacidade de suporte.

2.2.3 Sub-base

A camada de sub-base de um pavimento é executada quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Rodovias que suportam tráfego pesado, geralmente incluem a sub-base como parte da estrutura do pavimento, a menos que o subleito possua uma excelente capacidade de suporte. (PINTO E PREUSSLER, 2002).

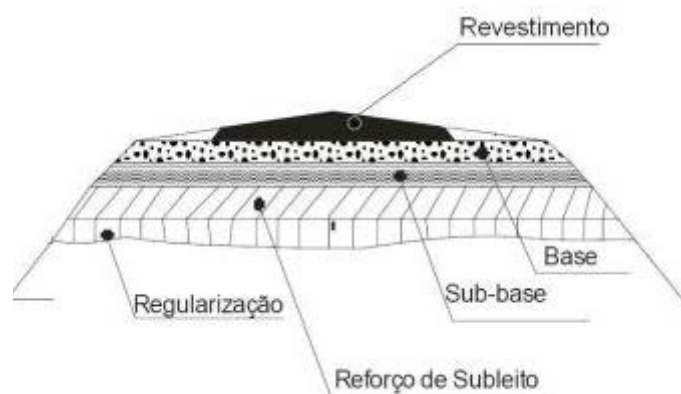
2.2.4 Base

A camada de base, localiza-se imediatamente abaixo da camada de revestimento e acima da sub-base, quando existente, é parte do pavimento cuja sua principal função é o suporte estrutural, promovendo a rigidez e a resistência à fadiga da estrutura (PINTO E PREUSSLER, 2002).

2.2.5 Revestimento

O revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, sendo assim, deve ser dimensionada para ser o mais impermeável possível, resistir as forças abrasivas do tráfego, proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos e proporcionar um rolamento suave e uniforme (PINTO E PREUSSLER, 2002).

Figura 2 – Estrutura típica de um pavimento



(fonte: SENÇO, 1997)

3. PROJETO ORIGINAL DE PAVIMENTAÇÃO DA AVENIDA JUSCELINO KUBISTCHEK – PELOTAS/RS

Este capítulo tem o intuito de referenciar o projeto original elaborado para a obra de recuperação da Avenida Juscelino Kubistchek, informando algumas questões como localização, premissas de projeto, materiais e métodos utilizados para o dimensionamento, entre outros aspectos relevantes do projeto original.

3.1 LOCAL DE APLICAÇÃO DO ESTUDO

A Avenida Juscelino Kubistchek de Oliveira é localizada no trecho entre a Av. Domingos de Almeida e a Av. Ferreira Viana, identificadas na figura 3. Localiza-se na cidade de Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul – Brasil.

Figura 3 – Localização da Avenida Juscelino Kubistchek



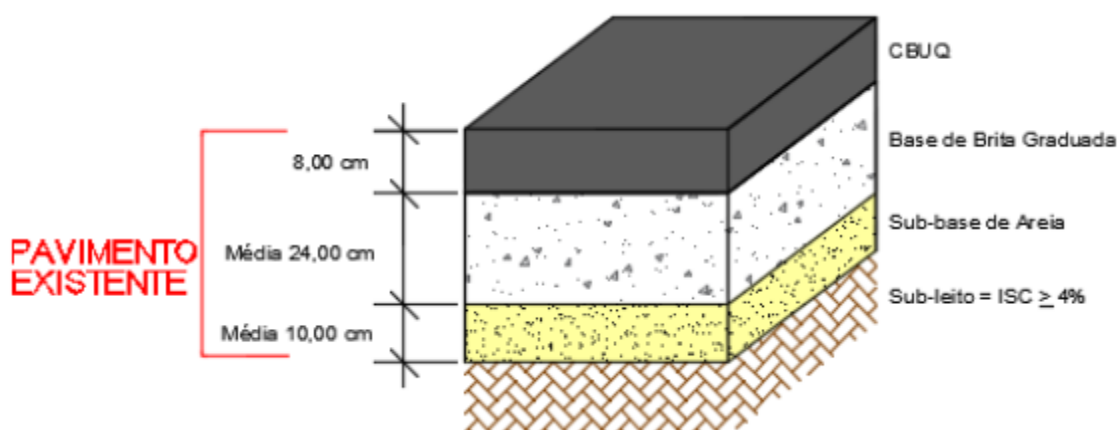
(fonte: Desenvolvimento de projetos de qualificação física do sistema de mobilidade urbana – Unidade de Gerenciamento de Pelotas)

3.2 PREMISSAS DE PROJETO

De acordo com o projeto, para o pavimento existente da Av. Juscelino K. de Oliveira será previsto um reforço estrutural para adaptar o pavimento às novas condições de tráfego, de forma a manter ou prolongar seu período de vida. Justificou-se tal solução em função de que após algum período de exposição ao tráfego e às intempéries, o pavimento vai perdendo sua capacidade estrutural e funcional, vindo então a necessitar de restauração, uma vez que no pavimento existente foram verificadas várias falhas como trinca do tipo couro de jacaré, desprendimento do material asfáltico, panelas, trilhas de roda, entre outras.

Com base nas extrações de corpos de prova no pavimento existente, realizados pela empresa projetista, encontrou-se a seguinte composição das camadas, conforme figura 4:

Figura 4 – Representação do pavimento existente



(Fonte: Desenvolvimento de projetos de qualificação física do sistema de mobilidade urbana – Unidade de Gerenciamento de Pelotas)

3.2.1 Dados de Tráfego

O número N é um dado que deve ser obtido no local ou em regiões próximas ao local do estudo. Ele se faz necessário tanto para dimensionamentos com métodos mecanísticos quanto para métodos empíricos. Segundo Pinto e Preussler (2002), para a utilização do método do DNER, o pavimento de projeto deve ser dimensionado em função do número “N” (número equivalente de operações de eixo simples padrão durante o período de projeto).

Segundo Marodin, *apud* Franco (2007), o número N é calculado pela equação 1, sendo obtido com a análise de três variáveis:

$$N = V_T * F_V * F_R \quad (\text{Equação 1})$$

V_T = Volume total de veículos por projeto

F_V = Fator de veículos

F_R = Fator climático regional

Onde:

$$F_V = F_E * F_C \quad (\text{Equação 2})$$

F_E = Fator de eixos

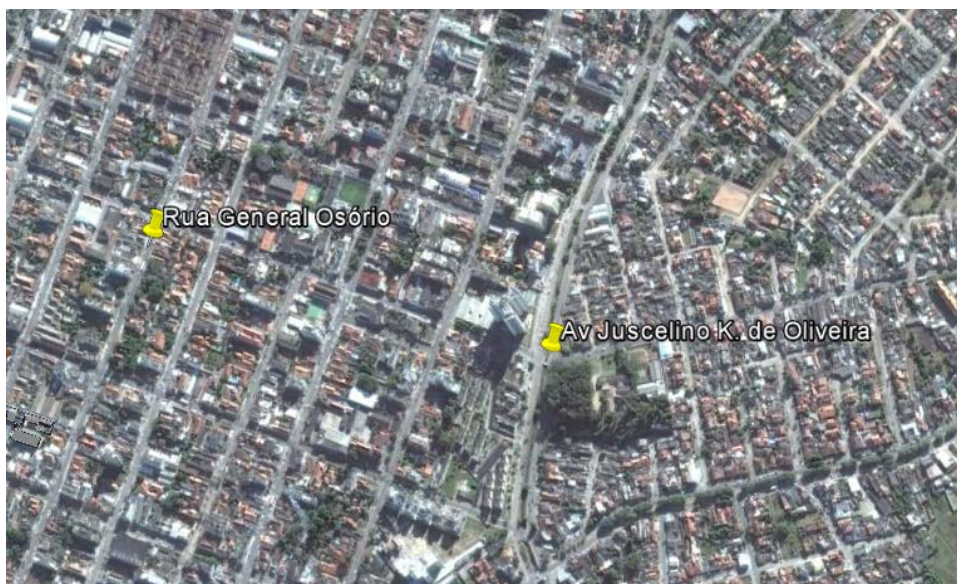
F_C = Fator de cargas

Para este projeto foi realizado um estudo de tráfego existente de uma rua próxima, a Rua General Osório, conforme figura 5, considerando um período de projeto de 2016 a 2025. A análise correta e ideal de projetos rodoviários, faz se sempre com a utilização do N referente ao local de estudo. Utilizar o estudo de tráfego de uma localidade próxima, além de ser uma aproximação, poderá levar tanto ao sub quanto ao sobre dimensionamento da necessidade de suporte do pavimento.

O número N utilizado para este projeto é de:

$N = 4,78 \times 10^5$ passagens do eixo padrão de 8,2 tf.

Figura 5 – Localização da Rua General Osório



(fonte: elaborado pela autora)

3.2.2 Período de projeto

Com base no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER/DNIT foi adotado que o período de projeto seria de 10 anos.

3.2.3 Materiais escolhidos

Levando-se em consideração os materiais disponíveis no Município de Pelotas, foi definido em projeto que os materiais utilizados seriam Cimento Asfáltico de Petróleo e agregados pétreos para elaboração de CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente, brita graduada simples e macadame.

Para a definição dos parâmetros mecânicos do pavimento do projeto, foram utilizados os valores já conhecidos destes materiais, amplamente utilizados em trabalhos anteriores e demonstrados em referências, conforme aponta o estudo.

3.3 DEFINIÇÕES E MÉTODOS

O método utilizado para o dimensionamento das camadas apontadas no projeto foi o Método do antigo DNER, também conhecido como o método do Engenheiro Murilo Lopes de Souza,

com data de publicação de 1981. Para realizar-se o dimensionamento, torna-se necessário conhecer alguns coeficientes, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Coeficientes de equivalência – Método DNER

Camada	Símbolo	Coeficiente de equivalência
CBUQ	K_R	2
Base de Brita Graduada	K_B	1
Sub-Base de Macadame Seco	K_{BS}	1

(fonte: Método de Dimensionamento DNER)

Segundo o método do DNER a simbologia designa para H_m , de modo geral, a espessura total de pavimento necessário para proteger um material com CBR ou IS igual a m . Para os parâmetros de projeto da estrutura do pavimento (ISP=6% e $N = 4,78 \times 10^5$) o método adotado recomenda as seguintes espessuras totais fictícias, constituídas de pedra britada:

$$H_6 = 49,50 \text{ cm e } H_{20} = 24,13 \text{ cm}$$

Para $N \leq 10^6$ o método utilizado no dimensionamento do projeto de pavimentos flexíveis recomenda o uso de Tratamento Superficial Duplo, porém foi adotado a espessura efetiva de 5,0 cm de Concreto Asfáltico. Na figura 6 foi ilustrado o cálculo realizado para a determinação das espessuras de cada camada do pavimento indicado como solução de projeto.

Figura 6 – Demonstração do cálculo da estrutura do pavimento de projeto

$N = 4,78 \times 10^5$	ISCp = 6%
CBUQ	
$K_r.R + K_b.B \geq H_{20}$	
$2,5,0 + 1,0.B \geq 24,13$	
$B \geq 14,13 \text{ cm}$	$B = 15 \text{ cm (adotado)}$
$K_r.R + K_b.B + K_{sb}.SB \geq H_5$	
$2,5,0 + 1,0.15 + 1,0.SB \geq 49,50$	
$SB \geq 24,50 \text{ cm}$	$SB = 32,00 \text{ cm (adotado)}$

(fonte: Desenvolvimento de projetos de qualificação física do sistema de mobilidade urbana – Unidade de Gerenciamento de Pelotas)

3.4 PAVIMENTO PROJETADO

Após o término do dimensionamento, ficou estabelecido que o novo pavimento seria composto pelas seguintes camadas (figura 7):

- Revestimento de Concreto asfáltico: 5,0 cm;
- Base de Brita Graduada (BGS): 15,0 cm;
- Sub-Base de Macadame Seco (MS): 32,0 cm em duas camadas com 16,0 cm de espessura

Figura 7 – Ilustração do pavimento indicado em projeto



(fonte: elaborado pela autora)

4. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Este capítulo trata da utilização dos RCD no Brasil e em outros países, das normas reguladoras que regem a sua utilização e sua classificação perante o CONAMA.

4.1 USO DOS RCD

O histórico da pavimentação no mundo tem registro de algumas décadas atrás. Na Holanda, em meados da década de 70, o reuso de RCD em camadas de pavimentação já era uma prática comum. Em 2002 estudos laboratoriais foram realizados para estudar os efeitos da graduação, composição e grau de compactação dos RCD, referente às suas propriedades mecânicas, chegando à conclusão que o grau de compactação é o fator mais relevante (MOLENAAR E VAN NIEKERK, 2002).

Os RCD podem ser utilizados no lugar, por exemplo, da base de brita graduada, material que atualmente possui larga utilização no mercado. A BGS pode ser definida como uma base resultante da mistura, em usina ou in situ, de um agregado previamente dosado granulometricamente, contendo inclusive material de enchimento e parcela de água. (PINTO E PREUSSLER, 2002)

Segundo Leite (2007), a primeira via pavimentada constituída com resíduo da construção e demolição foi no ano de 1984, na cidade de São Paulo, em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Delongui (2016) comenta que recentemente o governo brasileiro liberou verbas para a execução de programas com foco na gestão dos RCD, porém tardiamente, visto que o crescimento do setor da construção civil se deu há mais de 10 anos, e sendo assim, todo o material descartado neste período não teve sua melhor destinação.

Segundo Zordan (2006), o melhor aproveitamento para os Resíduos da construção é quando aplicado na pavimentação, pois podem ser utilizados em reforço de subleito, em camadas de base e sub-base e até no revestimento primário, além de poderem ser utilizados em grandes quantidades, visto que são descartadas em larga escala.

Embora a reciclagem de RCD não seja tão recente no Brasil, a aplicação dos RCD para novas obras ainda é limitada devido ao ineficiente processo de separação dos agregados nas usinas de reciclagem, muito ainda pela falta de tecnologia aplicada no processo (REVISTA TÉCNICA, 2006).

4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RCD

Os resíduos da construção de demolição, de acordo com a resolução do CONAMA nº 109, são classificados nas classes A, B, C, e D, em ordem crescente de periculosidade:

Classe A – integrada pelos resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, quando inertes. Por exemplo: argamassa, azulejos, concreto, pisos porcelanatos, telhas cerâmicas, materiais de fibrocimento, tijolos, solos e rocha oriundos de escavação e terraplanagem.

Classe B – integrada pelos resíduos reutilizáveis, recicláveis para outras destinações desde que não contaminados. Por exemplo: borrachas, papelão, ferros e pregos, fiação, madeira, artefatos de PVC, acrílicos, papéis, pisos laminados.

Classe C – integrada pelos resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitiram a sua reciclagem/recuperação, destacando-se o gesso.

Classe D – integrada pelos resíduos perigosos e contaminados, destacando-se solos contaminados, lâmpadas fluorescentes, combustíveis, óleos, solventes entre outros.

4.3 NORMATIZAÇÃO

Os resíduos da construção e demolição são citados em quatro normas regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A NBR 15113 (2004) tem a missão de expor e fixar os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes. Já a NBR 15114 (2004) – Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação tem o objetivo de regulamentar os requisitos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A de forma a se ter um maior controle e uma possível destinação destes resíduos para fins mais nobres.

A NBR 15115 trata dos procedimentos de execução de camadas de pavimentação, estabelecendo os critérios para camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos,

bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado “agregado reciclado”.

Com o objetivo de estabelecer os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil a NBR 15116 vem delimitar as propriedades necessárias dos agregados para determinados fins. Segundo ela, o agregado reciclado pode ser utilizado em pavimentação, desde que proveniente de material classe A e que atenda aos requisitos gerais e específicos apresentados nas tabelas 2 e 3 apresentadas abaixo:

Tabela 2 – Requisitos Gerais

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graudo	Miudo	Graudo	Miudo
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	< 63mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma	< 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira 0,42mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesma características ¹	2	Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas	3	Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2	ABNT NBR 9917	

¹ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

(Fonte: ABNT NBR 15116 – 2004)

Tabela 3 – Requisitos Específicos

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	12	1,0	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	20	1,0	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹	60	0,5	Intermediária ou modificada

Permitido o uso como material de base socmente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições d eixo padrão de 8,2 tf (80KN) no período de projeto.

(Fonte: ABNT NBR 15116 – 2004)

Para analisar se os materiais RCD em estudo possuem os parâmetros físicos e mecânicos necessários para o emprego em camadas de pavimentação, foram realizados os ensaios de acordo com os parâmetros limitados nas normativas vigentes, listadas abaixo:

- a) ABNT NBR 7181 – Análise granulométrica;
- b) ABNT NBR NM 248 – Determinação da composição;
- c) ABNT NBR 7809 – Índice de forma.

Além das normas citadas, a NBR 15116 também solicita que alguns parâmetros sejam avaliados de acordo com os seus Anexos: A – Determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual; B – Determinação do percentual de materiais não-minerais dos agregados reciclados miúdos por líquidos densos.

4.4 PESQUISAS AFINS REALIZADAS NO LAPAV – UFRGS

Várias pesquisas veem sendo desenvolvidas pelo laboratório de pavimentação (LAPAV) da UFRGS aumentando o conhecimento da técnica de aplicação de resíduo da construção e demolição nas camadas inferiores dos pavimentos. O trabalho de diplomação da graduação desenvolvido por Rutzen (2015), abordou os efeitos da adição de cal hidratada nos RCD analisando as respostas estruturais através de modelos de previsão de comportamento, permitindo a comparação da vida de fadiga de pavimentos compostos de RCD estabilizadas com cal com alternativas de reciclagem já estudadas. Teixeira, (2014) assim como Bagatini, (2011) estudaram os RCD provenientes de Porto Alegre quando reutilizados para pavimentação de vias urbanas. Para isto, analisaram as características físicas e mecânicas do material, e sua resposta estrutural qual aplicado em camada portante de pavimentos.

Matuella, (2014 e 2017), realizou seu trabalho de diplomação da graduação, bem como a sua tese de mestrado na linha de pesquisa da utilização dos RCD em camadas de pavimento. Em suas pesquisas foram realizadas simulações de estruturas de pavimentos compostas por RCD em sua forma natural, melhorados com cimento Portland e por brita graduada. Ao final do trabalho foi possível conhecer os benefícios do resíduo da construção e demolição quando melhorados com cimento, bem como sua relevância quando comparado com soluções convencionais (brita graduada).

Delongui, (2016) desenvolveu sua tese de doutorado junto com a UFRGS abordando a determinação de parâmetros mecânicos para o dimensionamento de pavimentos com RCD. Em

suma, concluiu que os RCD podem ser utilizados como materiais para base e sub-bases de pavimentos de baixo volume de tráfego, dando um ótimo destino ao material que na maioria das vezes é descartado

5. METODOLOGIA

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento com utilização de material RCD foram avaliados três mecanismos de degradação: fadiga da camada asfáltica, ruptura por cisalhamento da base granular e deformações permanentes no topo do subleito.

5.1 ENSAIOS LABORATORIAIS

Para o dimensionamento racional (mecânico-empírico) das camadas do pavimento, foi necessário ensaiar o subleito local, para determinação de seu comportamento resiliente. O material foi cedido pela Empresa que realiza a obra de revitalização da avenida em estudo.

Para a devida caracterização dos agregados de RCD, foram conhecidos os resultados de todos os ensaios especificados na NBR 15116 (2004) – conforme as tabelas 2 e 3, onde são estabelecidos os requisitos mínimos que os RCD devem apresentar em cada avaliação para sua destinação à pavimentação. Sendo assim, destaca-se que foram utilizados os parâmetros físicos, de resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência, já obtidos em pesquisas anteriores realizadas no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e no Laboratório de Geotecnologia (LAGEOtec) da UFRGS. Dentre todas as pesquisas realizadas, optou-se pelo estudo realizado por Delongui (2016). De posse desses parâmetros foi feita uma análise estrutural utilizando o *software* Everstress, para calcular tensões e deformações desenvolvidas no pavimento.

5.1.1 Ensaios de Caracterização

Antes de iniciar-se um projeto é necessário que haja um estudo prévio sobre as características de cada material utilizado. Os ensaios de caracterização visam conhecer os parâmetros de cada material ensaiado, para assim, avaliar as suas aplicabilidades em cada obra.

5.1.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria de um agregado é realizado de acordo com a Norma DNER – ME 083/98. Para a escolha da granulometria, utilizam-se as faixas granulométricas expostas no Manual de Pavimentação do DNIT, entre as quais deverá se situar a curva granulométrica do

material a ser utilizado. Desta forma, a realização deste ensaio é importante devido a necessidade da verificação da composição do material escolhido, pois assim se define qual a faixa granulométrica na qual o material se encaixa, e se para esta dada faixa, o volume de tráfego suportado é adequado conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Faixas Granulométricas – especificadas pelo DNIT

Tipos Faixas	N > 5x10 ⁶				N < 5x10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30 - 65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
nº4	25 - 55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	±5
nº10	15 - 40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

(Fonte: DNIT 141 – ES/2010)

5.1.1.2 Compactação

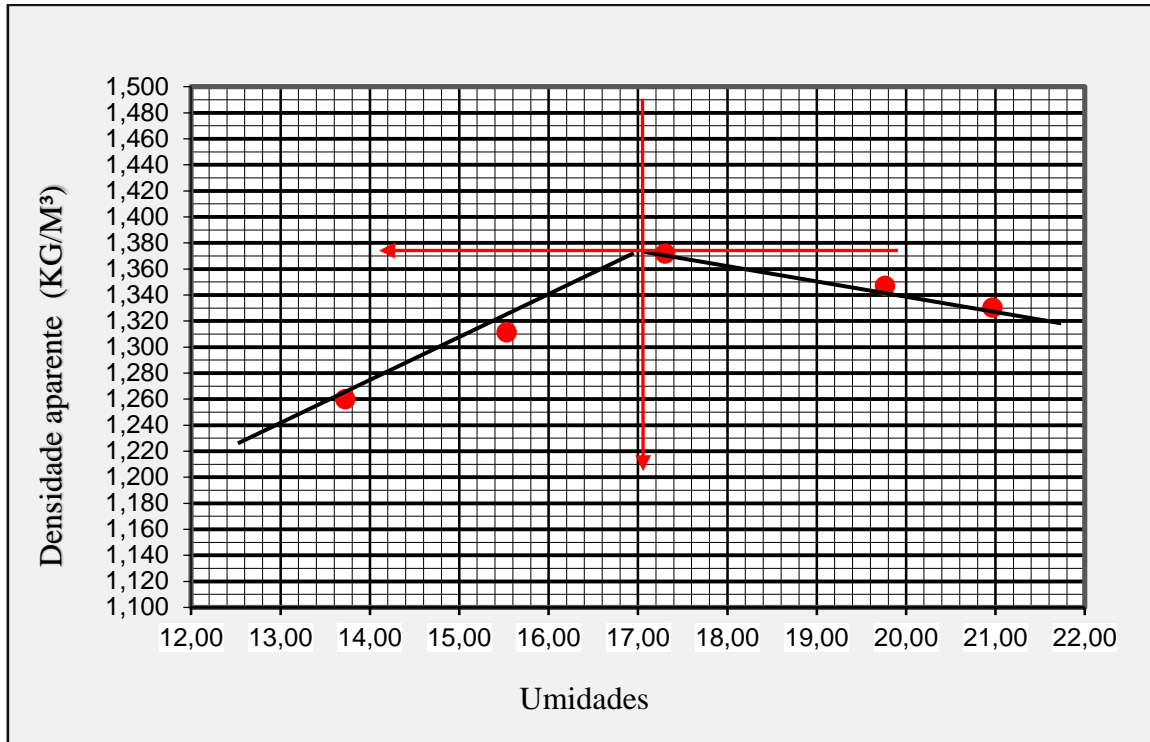
O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a Norma do DNIT 164/2013 – ME, sem reuso de material. Este ensaio é utilizado para a determinação da umidade ótima de um material, para que quando compactado o material apresente o maior peso específico aparente seco possível, e assim, a menor volume de vazios de ar.

Segundo a norma para o ensaio de compactação, existem três energias de compactação disponíveis: normal, intermediária e modificada. Estas energias diferem no número de golpes para a compactação de cada camada, considerando-se sempre o mesmo tipo de soquete e o mesmo molde cilíndrico.

Após compactarem-se várias amostras com diferentes teores de umidade, plotam-se os pares ordenados teor de umidade e peso específico aparente seco, resultando na curva de

compactação. O ponto máximo da curva tem como coordenadas o teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo.

O ensaio foi realizado em campo e a curva de compactação respectiva ao material de subleito estudado neste trabalho encontra-se abaixo.



Portanto, a densidade aparente máxima do material foi de 1,372 g/cm³, bem como a umidade ótima foi de 17,3%.

5.1.2 Ensaio de resistência mecânica e de deformabilidade elástica

Além da determinação das características físicas dos materiais, é importante que a resistência mecânica dos materiais seja avaliada, pois assim saberemos se os carregamentos impostos pelo tráfego serão suportados pelos materiais escolhidos.

5.1.2.1 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência é fundamental para o dimensionamento mecânico. Pinto e Preussler (2002) afirmam que:

[...] é a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável

correspondente a tensão aplicada, numa temperatura, para uma certa frequência de aplicação de carga.

O módulo resiliente varia de acordo com a natureza do solo (constituição mineralógica, textura, plasticidade) umidade, densidade e estado de tensões (PINTO E PREUSSLER, 2002).

O ensaio que determina o módulo de resiliência dos materiais é regido pela Norma do DNIT 134 – (2010), sendo com base nos resultados obtidos neste ensaio que se fundamenta o dimensionamento mecânico de pavimentos, adotando o princípio de que, para os pavimentos flexíveis as camadas do pavimento deverão ter módulo de resiliência decrescentes do topo para a base.

Para solos arenosos e materiais granulares, há dois modelos preferenciais para expressar o comportamento resiliente de agregados, denominados modelos MR- σ_3 e MR- θ/P_{atm} . A normativa vigente deste ensaio conduz para que seja utilizando o primeiro modelo, porém o *software* Everstress faz uso do segundo modelo. Tais modelos são apresentados a seguir.

$$MR = k_1 * (\sigma_3)^{k_2} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$MR = k_1 * \left(\frac{\theta}{P_{atm}}\right)^{k_2} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$\theta = 3 * \sigma_3 + \sigma_d \quad \text{(Equação 5)}$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

MR: módulo de resiliência;

k1 e k2: parâmetros estatísticos do modelo;

Patm: pressão atmosférica;

σ_1 : tensão principal maior;

σ_3 : tensão principal menor, que no ensaio de MR é a tensão confinante e

σ_d : tensão desvio.

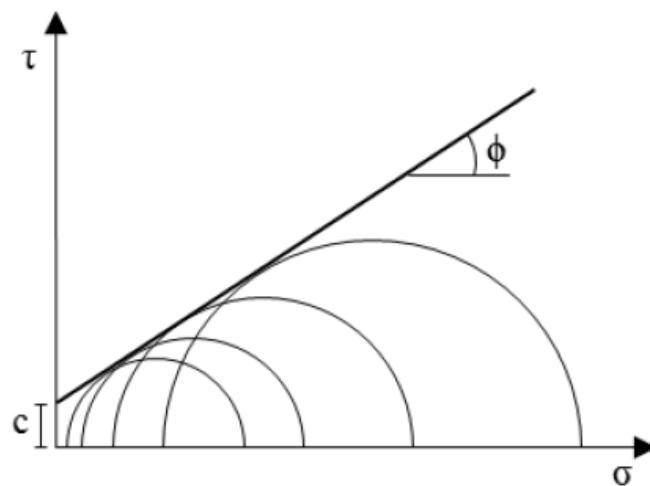
Para a modelagem do solo do subleito, por se tratar de um solo coesivo, o modelo empregado é o exposto na equação 7, que explicita que para módulos de resiliência de solos finos depende principalmente da tensão desvio do σ_d .

$$MR = f(\sigma_d) \quad (\text{Equação 7})$$

5.1.2.2 Resistência ao cisalhamento na compressão triaxial

Embora os ensaios triaxiais de resistência ao cisalhamento não sejam muito utilizados em projetos de pavimentação, seu emprego vem crescendo. A partir deste tipo de procedimento é possível obter dados resultantes da ruptura para cada tensão confinante utilizada e assim, através da interpretação do diagrama de Mohr-Coulomb podemos obter os parâmetros de resistência como intercepto coesivo efetivo e ângulo de atrito interno segundo a figura 8:

Figura 8 – Definição de Parâmetros de Resistencia por Mohr-Coulomb



(fonte: Delongui 2016, *apud* Das, 2013)

$$\tau = c' + \tau * tg(\phi')$$

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin\phi') * \sigma_s + 2 * (c' * \cos\phi')}{(1 - \sin\phi')}$$

Onde:

- a) τ é a tensão de cisalhamento;
- b) c' é o intercepto coesivo efetivo;
- c) ϕ' é o ângulo de atrito interno efetivo;
- d) σ é a tensão normal;
- e) $\sigma_{1,f}$ é a tensão vertical de ruptura e
- f) σ_3 é a tensão de confinamento.

Embora não existam normativas brasileiras vigentes para este tipo de ensaio, pode-se utilizar como embasamento as normas americanas ASTM D 7181, (2011) para ensaios consolidados e drenados; ASTM D 4767, (2011) para ensaios consolidados e não-drenados e ASTM D 2850, (2007) para ensaios não-consolidados e não-drenados.

5.1.2.3 Carregamento monotônico

O ensaio de carregamento monotônico é realizado para a determinação de parâmetros como resistência ao cisalhamento, coesão (c) e ângulo de atrito (Φ). Para a determinação das diretrizes deste ensaio utiliza-se a Norma ASTM D 2850 – 03a. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007); nela há a indicação de se realizar para pelo menos 3 diferentes tensões confinantes. Logo após, deve-se plotar as tensões de ruptura para essas diferentes pressões em um único gráfico. Neste gráfico, desenham-se as envoltórias de Mohr-Coulomb e plota-se uma reta que tangencie essas 3 envoltórias. Dessa reta, obtém-se os parâmetros de c e Φ . Outra maneira de obter estes parâmetros é traçando as trajetórias das tensões sofridas pelo corpo de prova e, após a realização do ensaio para as diferentes tensões confinantes, unir os pontos máximos das trajetórias obtidas, gerando a linha kf, e utilizando-se relações matemáticas.

5.2 PARÂMETROS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os parâmetros de resistência do subleito, utilizados no dimensionamento foram obtidos no presente estudo; os parâmetros dos RCD *in natura* foram obtidos da pesquisa desenvolvida por Delongui (2016), enquanto que o valor de módulo resiliente, coesão e ângulo de atrito do material pétreo granular foram provenientes da pesquisa realizada por Malysz (2009). Para o dimensionamento completo da estrutura original do pavimento, o qual era composto por uma camada de macadame seco, foram utilizados os valores de módulo resiliente da pesquisa desenvolvida por Núñez *et al.* (2012).

5.2.1 Parâmetros físicos e mecânicos do solo do subleito local

Para iniciar o dimensionamento do comportamento mecânico do pavimento, tornou-se necessário o conhecimento do módulo resiliente do subleito local encontrado na avenida Juscelino Kubitschek de Oliveira. O experimento triaxial de módulo resiliente foi realizado para três corpos de prova em condições iguais. Para solos granulares o interessante é que seja utilizado o modelo onde MR varia em função de σ_3 . Porém para solos coesivos, considerado que o MR diminui exponencialmente com σ_d , é mais aconselhável que se utilize:

$$MR = f(\sigma_d) \quad (\text{Equação 13})$$

Primeiramente foi necessário passar todo o material na peneira de número 4, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Passagem pela peneira número 4 indicada pela norma



(fonte: elaborado pela autora)

Para a realização do experimento, utilizou-se corpos de provas de dimensões 10x20cm, moldando-se 5 camadas de espessuras de 4 cm, conforme figura 10. Após a compactação de todas as camadas, o corpo-de-prova foi introduzido na câmara de ensaio, e esta foi lacrada, verificando-se também todas as conexões.

Figura 10 - Moldagem em camadas



(fonte: elaborado pela autora)

Após a correta conexão dos aparelhos, iniciou-se a fase de condicionamento do ensaio, conforme figura 11



(fonte: elaborado pela autora)

Nesta etapa, segundo a normativa vigente, aplica-se uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio. A frequência das cargas aplicadas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) e a duração é de cerca de 0,10 segundo. Devido à natureza do solo estudado, foi realizada uma adaptação nos valores de tensões aplicadas neste momento, caso contrário, o corpo de prova não resistiria a ponto de não entrar nas devidas tensões do ensaio propriamente dito. Segundo a Norma, as frequências de tensões para a fase de condicionamento apresentam-se na Tabela 9. As tensões aplicadas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 5 – Tensões indicadas pela Norma – Fase de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
20,70	20,70	2
68,90	68,90	2
102,90	309,00	4

Tabela 6 – Tensões Fase Condicionamento – Aplicadas

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
20,70	20,70	2
20,70	20,70	2
68,90	68,90	2

(fonte: elaborado pela autora)

Após o término da fase de condicionamento, que teve a duração de 600 ciclos, iniciou-se o ensaio. Nesta etapa, o corpo de prova foi submetido a pares de tensões com valores crescentes e duração de 0,1s.

5.2.2 Parâmetros físicos e mecânicos dos RCD

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento com utilização de material RCD, foi necessário conhecer os parâmetros físicos e mecânicos desse material. Para isto, utilizou-se os resultados obtidos nos ensaios realizados na tese de doutorado ‘Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição’ realizada por Delongui (2016).

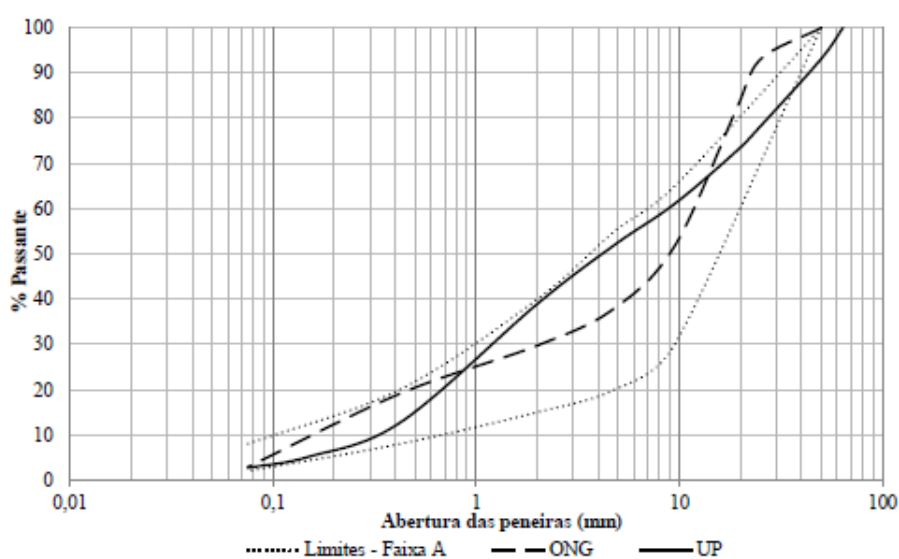
Em sua pesquisa, Delongui estudou os RCD provenientes de duas fontes de reciclagem, a primeira, localizada na zona sul da cidade de Porto Alegre, fruto de uma iniciativa popular, e sem fins lucrativos. A segunda fonte de RCD estudada foi do material proveniente de uma unidade privada, localizada na zona norte da cidade de Porto Alegre. Optou-se por neste trabalho, realizar a análise em cima de uma fonte apenas, a ONG, visto possuir parâmetros físicos mais abrangentes para a proposta deste trabalho.

5.2.2.1 Análise Granulométrica

Delongui realizou diversos ensaios de laboratório para analisar da melhor forma os comportamentos dos RCD, dentre os quais é foco expor neste trabalho os seguintes resultados obtidos por ele: análise de adequação granulométrica para verificação do atendimento da NBR15116 e ensaio de módulo de resiliência para dimensionamento do comportamento do pavimento.

Primeiramente, Delongui analisou os parâmetros das distribuições granulométricas dos RCD foco do estudo, através da figura 12 a qual relaciona as curvas encontradas pelos RCD estudados, ONG e Privada, com a Faixa A do da Norma Rodoviária DNIT 141 – ES (DNIT, 2010). Através do gráfico 17, Delongui, constatou que em ambas as curvas, parte da fração acima de 19mm não está completamente inserida nos limites da faixa A, observando, também que a faixa a qual o material mais se enquadra, também e a que permite utilização de material mais grosseiro, sendo indicada para $N > 5 \times 10^6$, a qual atende a necessidade da Av. Juscelino Kubitschek.

Figura 12 – Distribuição granulométrica dos RCD x Faixa A



(fonte: Delongui, 2016)

Delongui observou também, através da análise granulométrica que os agregados dos RCD Classe A provenientes da ONG, possuíam parâmetros físicos que atendiam aos requisitos necessários contidos na NBR 15116, conforme Tabela 12.

Tabela 7 – Comparação de parâmetros dos RCD exigidos pela Norma 15116

Propriedades:	NBR 15116 - Agregados - Classe A	Parâmetros RCD - ONG
Composição granulométrica	C _{nu} >10	86,7
Dimensão máxima característica	< 63mm	50mm
Índice de Forma	< 3	2,5
Teor de material passante na peneira 0,42mm	Entre 10% e 40%	ok
Contaminantes - teores máximos em relação a massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesma característica Materiais não minerais de características distintas Sulfatos	< 2% < 3% < 1%

(fonte: adaptado de Delongui, 2016)

5.2.2.2 Módulo de resiliência

Com o intuito de descrever a deformação elástica dos RCD em estudo, Delongui realizou os ensaios de módulo de resiliência, de forma que fosse possível a realização do dimensionamento mecanístico-empírico. O ensaio de módulo resiliente foi realizado por ele, com base na norma já exposta, utilizada também para a análise do solo do subleito do local.

Os parâmetros encontrados por Delongui, para os ensaios de módulo de resiliência realizados em corpos de prova de 10 x 20 cm, para os RCD provenientes da ONG são os apresentados na Tabela 13:

Tabela 8 – Parâmetros obtidos RCD

Ensaio	k1	k2	R ²
MR - θ /Patm	53,00	0,51	0,93

(fonte: adaptado de Delongui, 2016)

Através da realização do ensaio de cisalhamento, Delongui também observou os parâmetros de coesão e ângulo de atrito dos RCD que se encontram apresentados na Tabela 14.

Tabela 9 – Coesão e ângulo de atrito apresentados pelos RCD

RCD	c (kPa)	ϕ (°)
Delongui, 2016	60	41

(fonte: adaptado de Delongui, 2016)

5.2.3 Parâmetros físicos e mecânicos da BGS

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento com utilização de material BGS, utilizou-se os resultados obtidos nos ensaios realizados na tese de mestrado ‘Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos’ realizada pelo Doutor Rodrigo Malysz através da UFRGS, no ano de 2009.

Malysz, 2009 observou em sua tese alguns dos parâmetros da brita bem graduada de basalto oriunda da britagem de rocha sã que serão utilizados como base para o desenvolvimento deste estudo. Malysz, 2009 realizou seu estudo com base em dois modelos: o primeiro, $MR-\sigma_3$, indicado na normativa vigente e o segundo, $MR-\theta$, normalizado pela pressão atmosférica, e utilizado neste trabalho por ser o modelo ideal para materiais granulares, e também, por ser o modelo utilizado pelo programa de análise mecânica Everstress, o qual será utilizado para iterações na análise de desempenho do pavimento. Os parâmetros de módulo resiliente encontrado por Malysz, encontra-se exposto na Tabela 15.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos BGS

Ensaio	k1	k2	R ²
MR - θ /Patm	62,65	0,893	0,9782

(fonte: adaptado de Malzy, 2009)

Malzy também analisou coeficiente de atrito e coesão da BGS estudada através do ensaio de cisalhamento, e concluiu o que se apresenta na Tabela 16:

Tabela 11 – Coesão e ângulo de atrito – BGS

BGS	c (kPa)	ϕ (°)
Malzy, 2009	71	60

(fonte: Malzy, 2009)

5.2.4 Parâmetros físicos e mecânicos do macadame

Com a preocupação de diminuir significativamente as deformações permanente, e também conferir uma maior capacidade de suporte, foi proposto no projeto original da rodovia uma camada de 32cm de macadame. Bernucci *et al.* (2008), afirma que se tratando de subleitos de baixa capacidade de suporte, pode-se empregar um material granular de grandes dimensões, que, por cravamento e posterior intertravamento, tem o propósito de reduzir significativamente as deformações permanentes e auxiliar na construção das demais camadas subsequentes por oferecer um aumento significativo de suporte.

Para o valor de módulo resiliente da camada de macadame, foi utilizado o estudo desenvolvido por Núñez *et al* (2012), referente ao projeto de pavimentação da rodovia do parque BR448/RS no ano de 2012. Núñez expos que a experiência regional mostra que o macadame seco trabalha com módulos de resiliência de pelo menos 300 MPa.

5.3 ANÁLISE DO ESTRUTURA DO PAVIMENTO

5.3.1 *Software* Everstress 5.0

Desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation*, o programa Everstress 5.0 foi criado para fazer análises computacionais a respeito das tensões e deformações encontradas nas camadas dos pavimentos.

Pinto e Preussler (2002) afirmam que tem havido um grande crescimento nos últimos anos do uso da teoria de camadas elásticas nos projetos de pavimentos novos e para reforços de pavimentos antigos. Alicerçados a isto, foi utilizado o *software* Everstress para avaliação do comportamento do pavimento diante da aplicação de carga. Para isto, foi preciso conhecer/definir os parâmetros utilizados como dados de entrada:

- a) coeficiente de Poisson;
- b) espessura;
- c) módulo de resiliência (ou os coeficiente k_1 e k_2 , quando conhecido o comportamento resiliente do material);
- d) cargas aplicadas;
- e) pressão de enchimento dos pneus;
- f) profundidades nas quais serão realizadas as análises.

De posse destes dados, foram analisadas duas estruturas de pavimento: a primeira, a solução de projeto, contemplando camadas de CBUQ, BGS, macadame e subleito; a segunda, composta por CBUQ, RCD, macadame e subleito. Da análise do Everstress se conheceu as tensões necessárias para aplicação do Método de dimensionamento Mecanístico da Republica da África do Sul.

5.3.2 Método de Dimensionamento Mecanístico da Republica da África do Sul (South African Mechanistic Design Method)

Observando a importância de avaliar-se a segurança das camadas de base e sub-base granulares (com RCD ou BGS) contra ruptura por cisalhamento, a vida de fadiga do revestimento em CBUQ e as deformações permanentes no topo do subleito, procurou-se na literatura diferentes modelos de previsão de comportamento do pavimento. Sendo assim, para avaliar as estruturas de pavimento composto por BGS e RCD foi utilizado o Método de Dimensionamento Mecanístico da Republica da África do Sul (SOUTH AFRICAN MECHANISTIC DESIGN METHOD) chegando-se a valores estimados de ciclos de aplicação de cargas de eixo padrão até a ruptura da camada.

O modelo de SAMDM prevê danos ao pavimento para mistura asfáltica quente por fadiga, já para as bases granulares, o rompimento previsto é por deformação permanente, ainda, o modelo propõe a análise das tensões no topo do subleito.

5.3.2.1 Análise de fadiga em mistura asfáltica

A partir da metodologia proposta por SAMDM, as camadas de revestimento asfáltico foram analisadas quanto à fadiga. Supõe-se que as fissuras comecem na camada inferior até se propagar a superfície. De acordo com a quantidade de fissuras existente em uma rodovia, a sua serventia poderá ser diminuída. Desta forma, a área de fissuras aceitável, varia de acordo com a confiabilidade atribuída à classe da rodovia. Para analisar a fadiga na camada de revestimento asfáltico o método expõe a seguinte expressão:

$$N_f = 10^\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

N_f : número de passagens de eixo padrão até o início do trincamento por fadiga;

α, β : parâmetros constantes;

ε_t : deformação horizontal na parte inferior da camada.

Os parâmetros α, β variam conforme a confiabilidade necessária para a rodovia, distribuição granulométrica dos agregados e espessura da camada, podendo ser retirados da Tabela 5.

Tabela 12 – parâmetros α, β dos modelos de fadiga

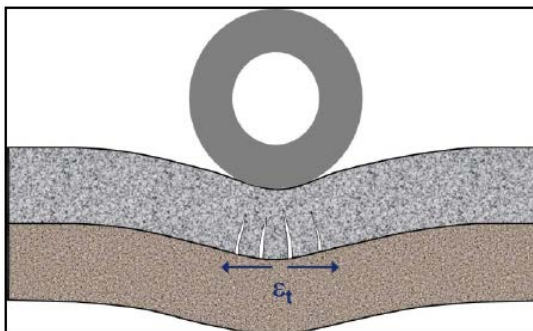
Superfície fina (< 50 mm)										
Nível de confiabilidade (Categoria)	Graduação Contínua				Graduação Gap					
	α		β		α		β			
95% (A)	17,40		3,40		15,79		3,705			
90% (B)	17,46		3,41		15,85		3,719			
80% (C)	17,54		3,42		16,93		3,736			
50% (D)	17,71		3,46		16,09		3,774			

Camadas espessas (> 75 mm)										
Nível de confiabilidade (Categoria)	Rigidez do asfalto (MPa)									
	1000		2000		3000		5000		8000	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
95% (A)	16,44	3,378	16,09	3,357	15,78	3,334	15,52	3,317	15,086	3,227
90% (B)	16,81	3,453	16,43	3,428	16,11	3,403	15,73	3,362	15,296	3,272
80% (C)	17,25	3,543	16,71	3,487	16,26	3,435	15,83	3,383	15,390	3,291
50% (D)	17,87	3,671	17,17	3,583	16,68	3,524	16,10	3,441	15,650	3,346

(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

O valor da deformação horizontal na fibra inferior da camada (ε_t), indicado na figura 13 necessário para a análise de ruptura do revestimento flexível por fadiga, é obtido através do *software* Everstress.

Figura 13 – Deformação Horizontal



(Fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

5.3.2.2 Análise da segurança da base granular contra rupturas por cisalhamento

Para o dimensionamento da vida útil do pavimento quanto à deformação permanente da camada granular, o SAMDM supõe que as camadas granulares acumulem deformação permanente a partir da ruptura por cisalhamento.

As camadas granulares são analisadas através da determinação do estado de tensão de corte no meio da espessura, e comparando isto com a resistência ao cisalhamento característica do solo, em termos de coesão e ângulo de atrito utilizando o modelo de Mohr-Coulomb. Este estado de resistência ao cisalhamento é utilizado para determinar a capacidade estrutural da camada. (*South African Mechanistic Design Method*, 2013)

O modelo utiliza as equações número 9, 10 e 11 expostas abaixo, juntamente com os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito). Para determinar as classes dos materiais em estudo, o método indica os parâmetros apontados nas tabelas 6 e 7

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad \text{(Equação 9)}$$

N = Número de passagens de eixo padrão contra ruptura por cisalhamento;

α, β = Constantes;

F = Relação de stress conforme equação 10.

$$F = \frac{\sigma_3 \left[K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) + 2 K C \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right]}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \text{(Equação 10)}$$

$$F = \frac{\sigma_3 \phi_{term} + C_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \text{(Equação 11)}$$

σ_1, σ_3 = Maior e menor tensões principais agindo no interior da camada;

C = Coesão;

Φ = Ângulo de atrito interno;

C_{term} = Valores de coesão indicados por grupo de material;

ϕ_{term} = Valores de ângulo de atrito interno indicados por grupo de material;

K = Constante de acordo com a umidade:

0,65 para solos saturados;

0,80 para solo moderadamente saturado;

0,95 estado normal.

Tabela 13 – Parâmetros α e β

Nível de confiabilidade	Constantes	
	α	β
95% (Categoria A)	2.605122	3.480098
90% (Categoria B)	2.605122	3.707667
80% (Categoria C)	2.605122	3.983324
50% (Categoria D)	2.605122	4.510819

(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

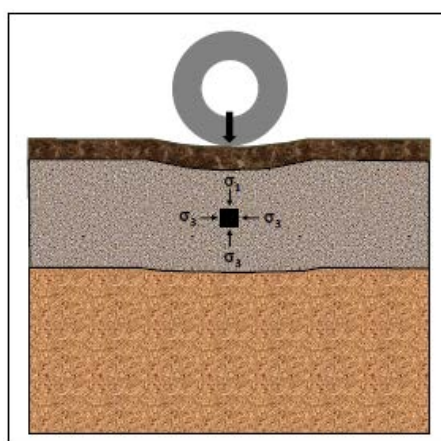
Tabela 14 – Classes dos materiais

Código do Material	Descrição do Material	Módulo Elástico Condição de Suporte	
		Cimentado	Granular
G1	Pedra britada de alta qualidade	250 – 1000 (450)1	150 – 600 (300)
G2	Pedra britada	200 – 800 (400)	100 – 400 (250)
G3	Pedra britada	200 – 800 (350)	100 – 350 (250)
G4	Cascalho natural (base com qualidade)	100 – 600 (300)	75 – 350 (225)
G5	Cascalho natural	50 – 400 (250)	40 – 300 (200)
G6	Cascalho natural (Sub-base com qualidade)	50 – 200 (225)	30 – 200 (150)
EG4	Material granular equivalente, G5 / G6 equivalente	–	200 – 400 (300)
EG5	Material granular equivalente, G7 / G8 equivalente	–	100 – 300 (200)
EG6	Material granular equivalente, G9 / G10 equivalente	–	30 – 200 (140)

(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

As tensões σ_1 e σ_3 no interior da camada, como mostra a figura 14, foram obtidas através do *software* Everstress.

Figura 14 – Resposta estrutural crítica e Localização para Camadas Granulares



(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

5.3.3.3 Análise das deformações permanentes no topo do subleito

O subleito da solução de pavimentos é analisado quanto à deformação permanente na camada, que se manifesta como deformação permanente ou ruptura ampla na superfície do pavimento.

Para seu dimensionamento, o SAMDM apresenta a equação (12) do modelo estudado frente a análise da tensão no topo do subleito e junto os parâmetros necessários para o desenvolvimento do cálculo. Além disso, é necessário conhecer a deformação compressiva vertical no topo da camada, obtida através do *software* Everstress, cuja localização está indicada na figura 15.

$$N_{PD} = 10 (a - 10 \log \varepsilon_v) \quad (\text{Equação 12})$$

N_{PD} = números de passagens do eixo padrão para causar deformação permanente;

ε_v = compressão vertical no topo da camada;

a = constante conforme Tabela 8

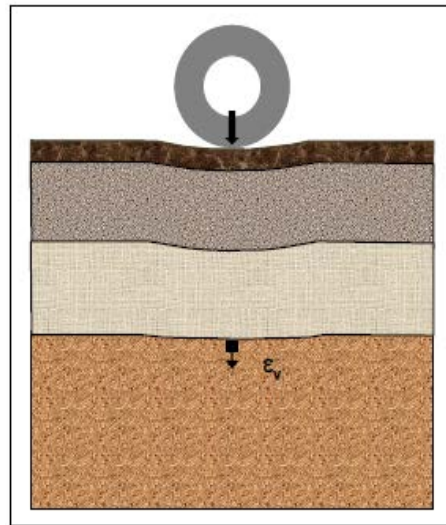
Dimensiona-se utilizando a deformação compressiva vertical no topo da camada, como mostrado na figura 15.

Tabela 15 – Parâmetro Crítico e Localização para Camadas Granulares

Constantes		
Nível de confiabilidade	a	
	10 mm de profundidade	20 mm de profundidade
95% (Categoria A)	33,70	36,70
90% (Categoria B)	33,47	36,47
80% (Categoria C)	33,38	36,38
50% (Categoria D)	33,30	36,30

(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

Figura 15 – Parâmetro Crítico e tensão no topo da camada de subleito



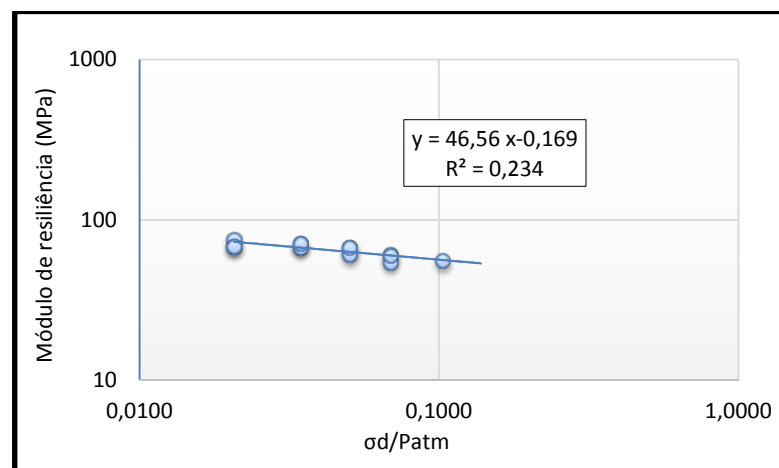
(fonte: South African Pavement Engineering Manual, 2013)

De posse de todos os dados, foi realizada a análise da capacidade estrutural da via estudada de acordo com as deformações permanentes causadas pelas tensões encontradas no topo do subleito.

6. RESULTADO DO ENSAIO DO SOLO DO SUBLEITO

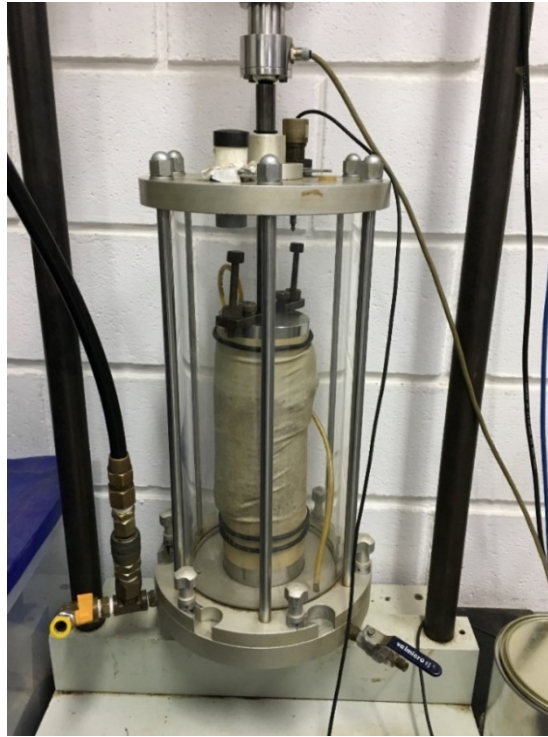
O Gráfico 1 demonstra o comportamento resiliente encontrado para o solo do subleito, bem como as figuras 16 e 17 ilustram o rompimento de um dos corpos de prova ensaiados, onde é possível ver uma ruptura por cisalhamento, o que revela a má qualidade do solo, uma vez que o ensaio de módulo de resiliência não objetiva a ruptura do corpo de prova.

Gráfico 1 – Comportamento resiliente do material de Subleito



(fonte: elaborada autora)

Figura 16 – Ruptura do corpo de Prova



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 17 – Corpo de prova rompido



(fonte: elaborado pela autora)

Desta forma, utilizou-se para o solo do subleito local os valores de k_1 , k_2 e R conforme Tabela 11:

Tabela 16 – Parâmetros do solo do Subleito

Ensaio	k_1	k_2	R^2
MP – σ_d	46,56	-0,169	0,234

(fonte: elaborado pela autora)

7. AVALIAÇÃO EMPÍRICO-MECANÍSTICA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

7.1 ANÁLISE DE TENSÕES

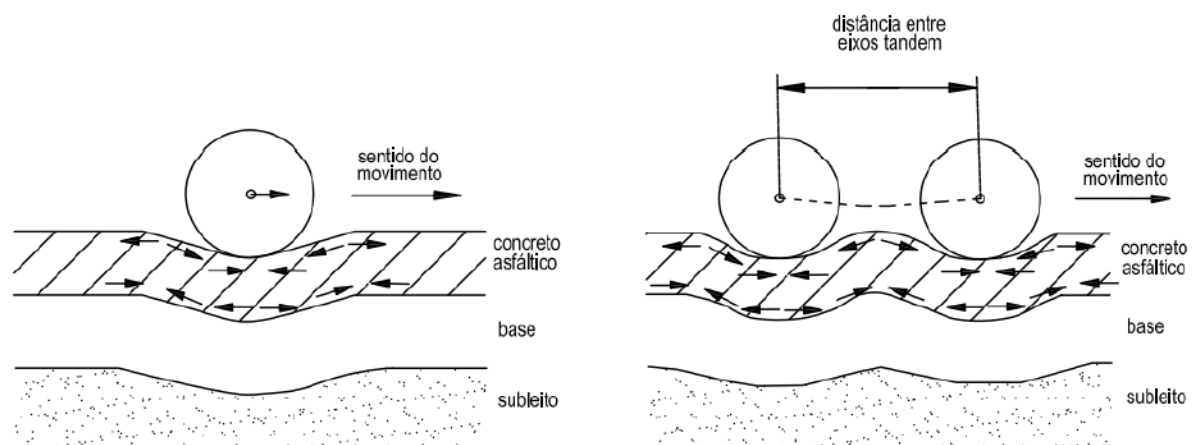
Com os dados necessários, realizou-se a análise empírico-mecanística com o *software* Everstress 5.0, e dele extraíram-se as tensões e deformações no pavimento resultantes de esforços produzidos por uma carga de 8,2tf, simulando a passagem de um eixo padrão. Segundo Balbo (2007), o módulo resiliente sugerido para revestimentos de concreto asfáltico convencionais em misturas quentes varia de 3.000 a 5.000 MPa. Posto isto, para a mistura asfáltica, utilizou-se um valor de módulo resiliente de 4000 MPa. Os relatórios obtidos no programa, encontram-se no anexo A deste trabalho.

7.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

De posse dos parâmetros físicos e mecânicos de todos os materiais necessários para a análise de desempenho das duas soluções de pavimento propostos, partiu-se para a comparação entre a variação do número N obtido para camadas de suporte com RCD e BGS.

Para o dimensionamento das soluções propostas no *software* Everstress, foi considerado a distância de 30cm, valor usual para a distância entre dois eixos

Figura 18 – Atuação da carga no pavimento com eixo simples e duplo



Para as análises realizadas neste trabalho, sob perspectiva do modelo da República Sul-Africana, optou-se por considerar a Avenida Juscelino Kubistchek como rodovia rural de categoria C com nível de confiabilidade de 80%.

Primeiramente realizou-se somente as análises considerando um revestimento asfáltico de espessura 5 cm. Porém percebendo-se a necessidade de encontrar uma solução com camada de suporte mais apropriada para a solicitação em estudo, projetou-se as mesmas soluções de base e sub-base para um revestimento de 10 cm.

7.2.1 Análise de fadiga em misturas asfálticas

Com os dados de tensões obtidos, optou-se por analisar primeiramente as soluções de pavimento quanto a sua fadiga no revestimento asfáltico, conforme equação 8. Onde os parâmetros utilizados foram:

N_f : número de passagens de eixo padrão até o início do trincamento por fadiga;

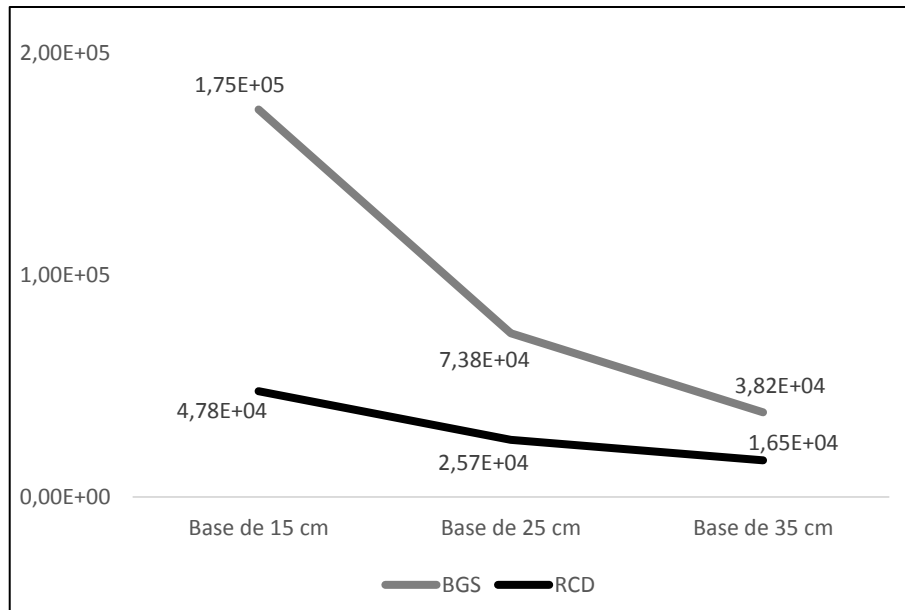
$\alpha = 17,54$

$\beta = 3,42$

ε_t : deformação horizontal na parte inferior da camada

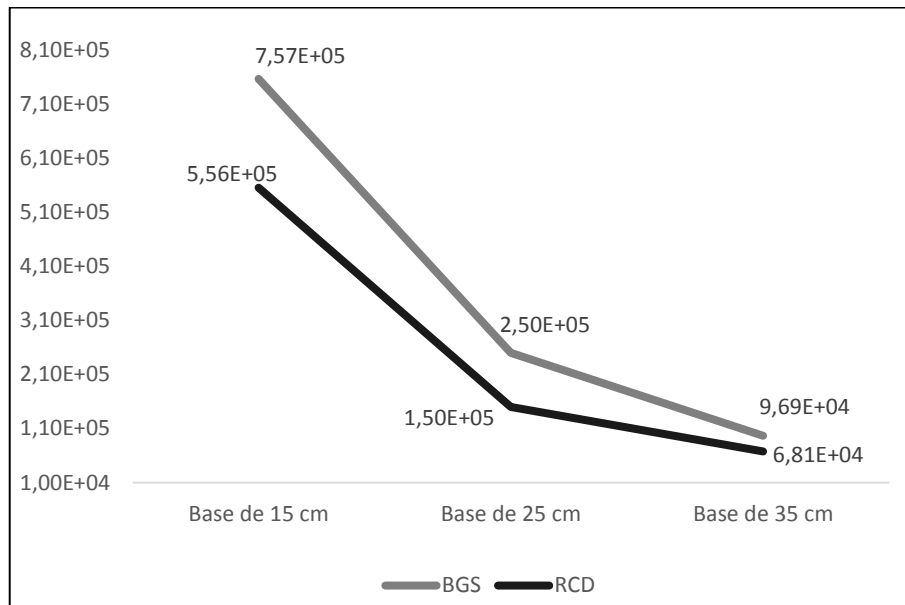
Os resultados obtidos na aplicação do modelo exposto, estão apresentados nos gráficos 2 e 3.

Gráfico 2 – Análise da fadiga do revestimento asfáltico – espessura CA = 5cm



(Fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 3 – Análise da fadiga do revestimento asfáltico – espessura CA = 10cm



(Fonte: elaborado pela autora)

7.2.2 Análise por deformação permanente em camada granular

A análise de deformação permanente na camada granular foi realizada conforme equação 9, apresentada no modelo da South African National Roads Agency Ltd. (2013). Com ela, calculou-se o número de passagens de eixo padrão conforme gráficos 4, 5. Os parâmetros de entrada para a equação encontram-se abaixo:

N = Número de passagens de eixo padrão contra ruptura por cisalhamento;

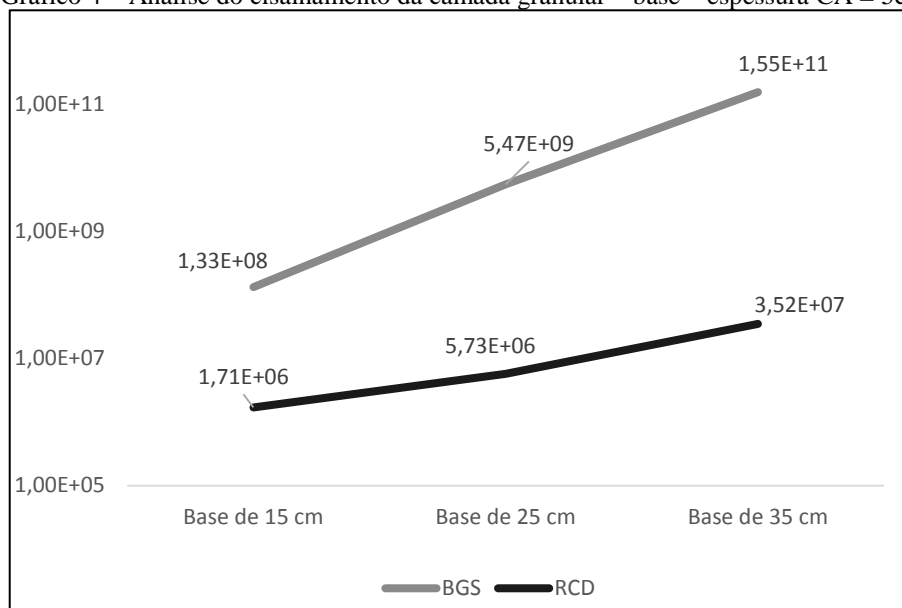
α = 2,605122;

β = 3,983324;

F = Relação de stress conforme Equação 10

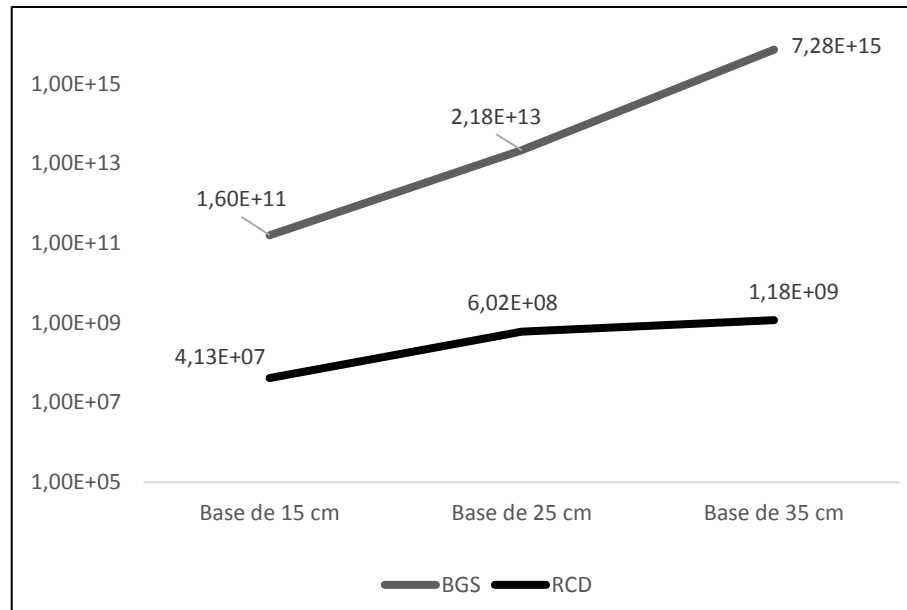
K = 0,8 para solo moderadamente saturado;

Gráfico 4 – Análise do cisalhamento da camada granular – base – espessura CA = 5cm



(Fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 5 – Análise do cisalhamento da camada granular – base – espessura CA = 10cm



(Fonte: elaborado pela autora)

7.2.3 Análise de deformações verticais no topo do subleito

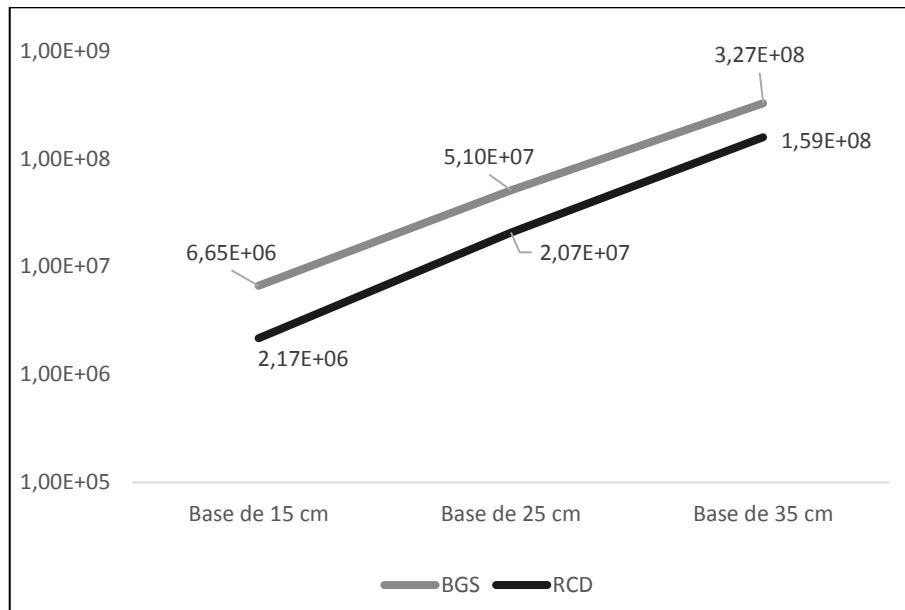
As análises das tensões no topo do subleito foram estudadas com base na equação 12 exposta pela República Sul Africana. Ela relaciona o número de passagens de um eixo padrão com as compressões verticais encontradas no topo da camada, e para ela, foram utilizados os parâmetros abaixo. Os resultados encontram-se nos gráficos 8 e 9.

N_{PD} = números de passagens do eixo padrão para causar deformação permanente;

$a = 33,47$

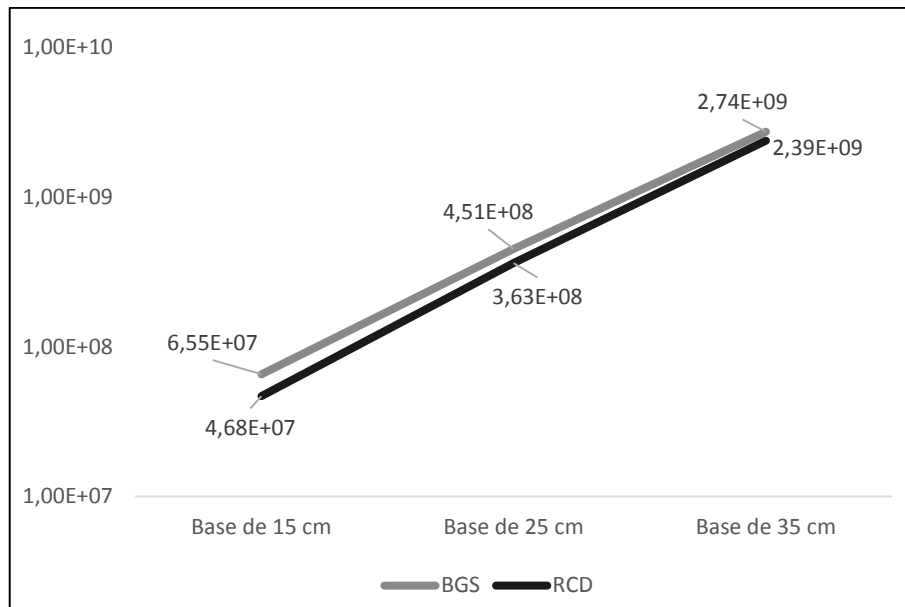
ε_v = compressão vertical no topo da camada;

Gráfico 6 – Análise da tensão no topo do subleito – espessura CA = 5cm



(Fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 7 – Análise da tensão no topo do subleito – espessura CA = 10 cm

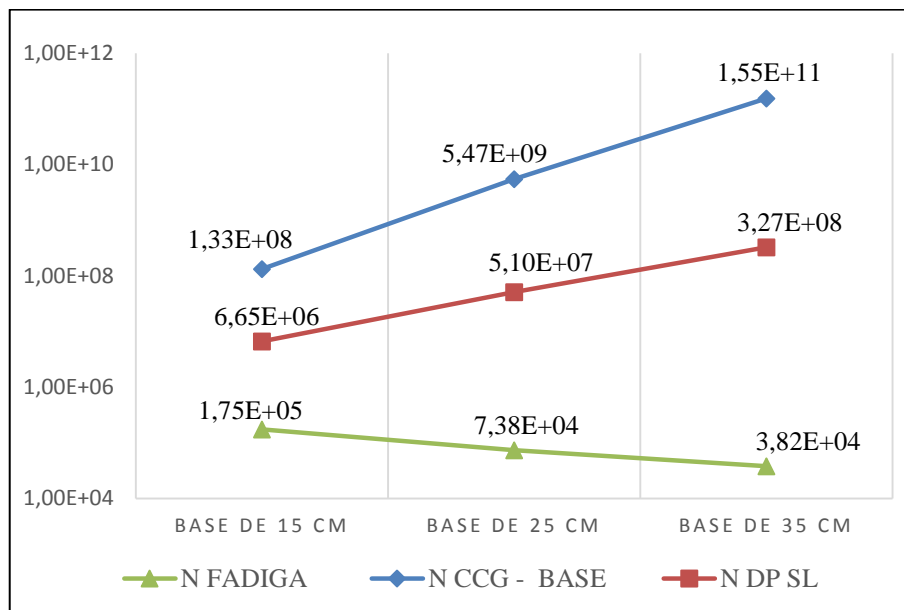


(Fonte: elaborado pela autora)

7.3 DESEMPENHO GERAL DOS PAVIMENTOS PROJETADOS

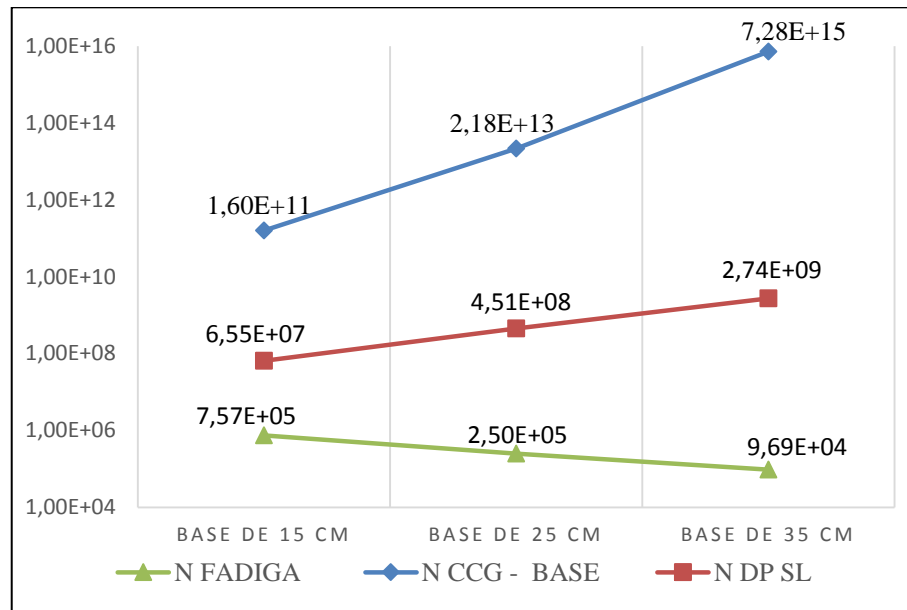
A partir das análises realizadas, foram compilados nos Gráficos 9, 10, 11 e 12 os comportamentos apresentados dos pavimentos estudados, com 5 e 10 cm de espessura do concreto asfáltico, e variando a espessura da camada granular composta por BGS e RCD. Além disso foi resumido na Tabela 17 as espessuras necessárias para atingir determinados valores de N, tanto para BGS quanto para RCD.

Gráfico 8– Análise geral do desempenho do pavimento – BGS – CA espessura = 5 cm



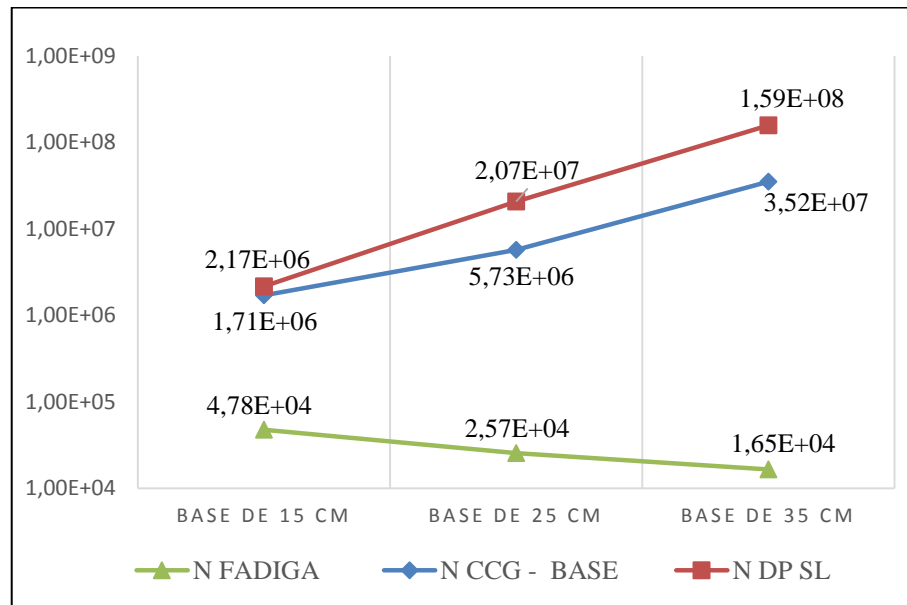
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 9 – Análise geral do desempenho do pavimento – BGS – CA espessura = 10 cm



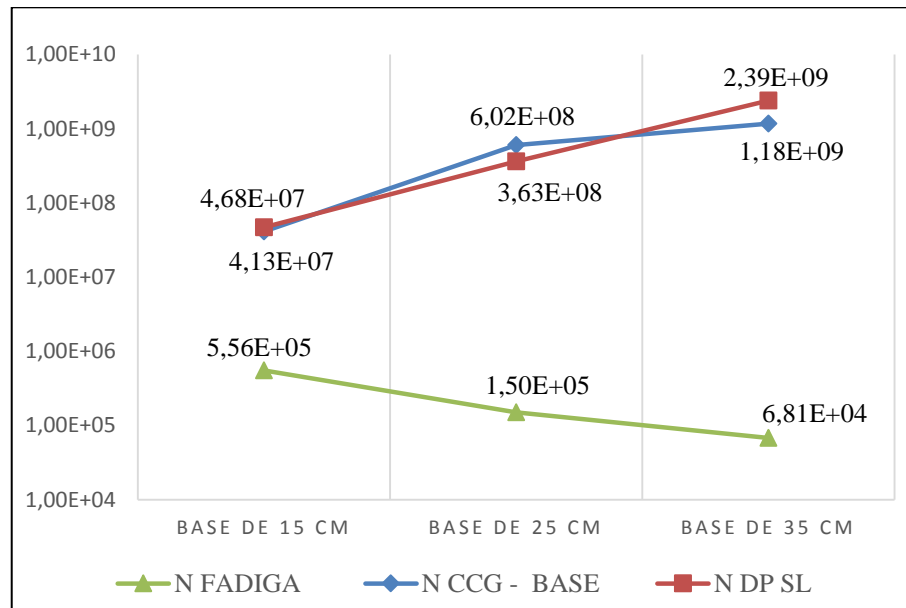
(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 10 – Análise geral do desempenho do pavimento – RCD – CA espessura = 5 cm



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 11 – Análise geral do desempenho do pavimento – RCD – CA espessura = 10 cm



(fonte: elaborado pela autora)

Tabela 17 – Resumo N obtido

	N FADIGA	N CCG - BASE	N DP SL
BGS 15 CM – 5 CA	1,75E+05	1,33E+08	6,65E+06
RCD 15 CM – 5 CA	4,78E+04	1,71E+06	2,17E+06
BGS 15 CM – 10 CA	7,57E+05	1,60E+11	6,55E+07
RCD 15 CM – 10 CA	5,56E+05	4,13E+07	4,68E+07
BGS 25 CM – 5 CA	7,38E+04	5,47E+09	5,10E+07
RCD 25 CM – 5 CA	2,57E+04	5,73E+06	2,07E+07
BGS 25 CM – 10 CA	2,50E+05	2,18E+13	4,51E+08
RCD 25 CM – 10 CA	1,50E+05	6,02E+08	3,63E+08
BGS 35 CM – 5 CA	3,82E+04	1,55E+11	3,27E+08
RCD 35 CM – 5 CA	1,65E+04	3,52E+07	1,59E+08
BGS 35 CM – 10 CA	9,69E+04	7,28E+15	2,74E+09
RCD 35 CM – 10 CA	6,81E+04	1,18E+09	2,39E+09

(fonte: elaborado pela autora)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após realizadas todas as análises em doze tipos de soluções de pavimento para estimar a capacidade estrutural dos pavimentos frente a diferentes mecanismos de degradação do pavimento, através do método de dimensionamento SAMDM, foram realizadas as devidas comparações de desempenho em relação a estrutura projetada para a Avenida Juscelino Kubistchek.

Em relação à análise de fadiga em misturas asfálticas, causadas pelas tensões horizontais de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, o projeto dimensionado pelo modelo empírico, quando comparado ao método SAMDM mostrou-se insatisfatório, devido o número N de projeto ser maior do que o N suportado pela estrutura do pavimento. Devido a falha no dimensionamento do projeto, o pavimento estará mais suscetível a degradação, que pode ocorrer pela sucessiva passagem de cargas, de ações climáticas e/ou por problemas construtivos. Desta forma, foi possível observar que a análise mecânica dos pavimentos se tornou indispensável para um correto dimensionamento. Assim, sugere-se que nos futuros estudos, além de se avaliar a possibilidade da utilização de materiais alternativos para a execução das obras, seja verificado mais profundamente o dimensionamento da estrutura, pois o estudo aponta que o investimento em questão será, de certa forma, incapaz de garantir uma vida útil para o pavimento de acordo com o esperado.

Expõe-se também que, além da alteração da espessura da camada do revestimento asfáltico, seria importante realizar um estudo técnico e econômico sob a possível alteração do revestimento asfáltico convencional para o revestimento asfáltico polimérico, o que melhoraria o módulo de resiliência do material, e por consequência, agregaria maior resistência a camada mais susceptível a ruptura neste estudo.

Ainda sob a perspectiva da análise a fadiga do revestimento, para a espessura de 10 cm de concreto asfáltico, apenas as estruturas compostas por 15 cm de camada granular, tanto as compostas por RCD quanto pela BGS, resultaram em um número N satisfatório para a Avenida em estudo.

Fica evidenciado também, que a utilização do número N para o dimensionamento do projeto original, não é o N característico da Avenida Juscelino Kubistchek, mas sim de uma rua próxima, e desta forma sugere-se que pela magnitude das vias o N da Avenida Juscelino Kubistchek possa ser ainda maior, diminuindo ainda mais a vida útil do pavimento.

Sob a análise do cisalhamento da base, a BGS apresentou desempenho superior tanto para as seções analisadas com espessura de concreto asfáltico de 5 cm, quanto para as seções com 10cm. Porém, o desempenho apresentado pelo RCD foi suficiente para suportar o esforço provocado pelo tráfego local, podendo ser utilizado para este projeto, com qualquer uma das três espessuras de camada de base proposta. Aqui fica clara a possibilidade da utilização de materiais alternativos na construção das camadas de pavimento.

Para todas as estruturas de pavimento analisadas, independente da espessura de camada de base adotada, o desempenho menos favorável à vida útil, ou seja, a possível causa de ruptura do pavimento, se dará pela fadiga do pavimento.

Analisando as tensões apresentadas por deformação permanente no topo do subleito foi possível concluir que a alteração do material de base BGS ou RCD não altera em grande escala o valor do número de passagens de eixo padrão. Pode-se concluir também que quaisquer espessuras de camada de base atenderiam ao tráfego local em estudo.

De uma forma geral, para todas as análises feitas neste estudo, as seções compostas por com uma espessura de 10 cm de concreto asfáltico e camada granular de 15 cm, apresentaram um número N suficiente para a solicitação estudada. Desta forma conclui-se que tanto a BGS quanto os RCD poderiam ser utilizados para este projeto.

Sob a ótica geral percebeu-se que os RCD oferecem de forma alternativa um desempenho competitivo quando comparado com a BGS, possuindo então, viabilidade técnica para ser utilizado na pavimentação de avenidas, levando sempre em consideração o tráfego local proposto.

A troca do material utilizado na camada granular depende sempre da disponibilidade local de agregados, porém a substituição da BGS pelos RCD ocasionaria uma diminuição no custo total da obra, visto o material alternativo possuir valores mais baixos do que a BGS. Juntamente com a economia financeira no projeto, agrega-se a ideia de que a construção precisa se renovar, e para isto encontrar uma solução mais sustentável, conforme propõe este estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2850**: standard test Method for unconsolidated-undrained triaxial compression test on cohesive soils. West Conshohocken, 2007.

_____. **ASTM-D718**: Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils, 2011.

_____. **ASTM-D4767**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, 2011.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP, **Índice de Preços Médio Ponderados, 2015 e 2016**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/>> Acesso: 15 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004

_____. **NBR 15.115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos Rio de Janeiro, 2004.

BAGATINI, F. **Resíduo de construção civil: Aproveitamento como base e sub-base na pavimentação de vias urbanas**, 2011, 72f, Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BALBO, JOSÉ TADEU. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A .P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil), **Resolução CONAMA n. 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

_____. **CONAMA: Resolução CONSEMA nº 109**. Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.

DELONGUI, L. **Determinação de parâmetros mecânicos para dimensionamento de pavimentos com resíduos de construção e demolição**. 2016. Tese (Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998a. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/DNER-ME083.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2016

_____. **DNER-ME 091/98**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1998b. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME091-98.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2016

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 3.ed.** – Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 134/2010 – ME**: pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010^a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit134_2010_me.pdf> Acesso: 29 out. 2016.

_____. **DNIT 141/2010 – ME**: pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit141_2010_es.pdf> Acesso: 29 out. 2016.

_____. **DNIT 164/2013 – ME**: solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit164_2013-me.pdf> Acesso em 29 out 2016

DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE QUALIFICAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA DE MOBILIDADE URBANA: Etapa III – **Projeto Executivo da Avenida Juscelino Kubitschek de Oliveira** – Unidade de Gerenciamento de Projetos (UGP). Pelotas, 2015.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MALYSZ, R. **Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. 2009. Tese de doutorado

(Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MATUELLA, M. **Resíduos de construção e demolição melhorados com cimento Portland: Contribuições para a aplicação em camadas inferiores de pavimentos.** 2014. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MOLENAAR, A. A; VAN NIEKERK, A. A. **Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials.** Washington, 2002.

NÚÑEZ, W.; CERATTI, J.; MALYSZ, R. Considerações do projeto de pavimentação da rodovia do parque – BR 448/RS – Seminário GEOSUL

PINTO, S.; PREUSSLER, E. Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. **Pavimentação Rodoviária**, p. 160, 2002.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

REVISTA TÉCNICA. **Reciclagem: uso de resíduos da construção.** Revista Técnica, São Paulo: Editora Pini, junho 2006.

RUTZEN, D. **Agregados reciclados para uso em pavimentação: efeitos da adição de cal em resíduos de construção e demolição.** 2015. 82f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo.** 2003. 130p. Teses (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY LTD. **South African Pavement Engineering Manual:** Chapter 10 - Pavement Design. Pretória, 2013.

TEIXEIRA, M. V. **Resíduo de construção e demolição: Reaproveitamento na pavimentação de vias urbanas.** 2014. 112f T Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TRICHÊS, G., KRYCKYJ, P. R. **Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., São José dos Campos, 1999. Anais. São Paulo: ABMS, 1999. p.259- 265.

ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil**. EPUSP, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm>. Acesso em: 09 nov. 2011.

**ANEXO A – Arquivos referente as estruturas dimensionadas com o auxílio
do software *Everstress 5.0***

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 15 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	15.000	180.48	182.15	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		58.31	58.32	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	1517.15	1800.55	-321.13	.00	10.67	.00
12.500	2	-64.55	-44.03	-219.89	.00	20.82	.00
36.000	3	16.23	26.44	-61.48	.00	20.56	.00
52.001	4	-2.94	-.96	-25.77	.00	4.19	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	249.84	345.49	-370.58	-6.591	.000	614.418
12.500	2	225.17	382.90	-968.73	-16.215	.000	530.154
36.000	3	100.82	148.44	-261.81	-16.552	.000	417.739
52.001	4	155.82	205.04	-411.74	-25.892	.000	377.625

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-321.20	1517.21	1800.55	-370.60	249.86	345.49
12.500	2	-222.64	-61.81	-44.03	-989.81	246.25	382.90
36.000	3	-66.58	21.34	26.44	-285.63	124.65	148.44
52.001	4	-26.51	-2.20	-.96	-430.28	174.36	205.04

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-609.57	945.32	-202.41	.00	.00	.00
12.500	2	-94.55	-43.22	-190.59	.00	.00	.00
36.000	3	18.21	28.09	-68.29	.00	.00	.00
52.001	4	-2.44	-.97	-27.93	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-217.40	307.38	-79.98	.000	.000	593.795
12.500	2	-5.67	388.89	-743.75	.000	.000	541.259
36.000	3	114.32	160.39	-289.37	.000	.000	434.004
52.001	4	181.12	217.76	-452.62	.000	.000	389.750

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-609.57	-202.41	945.32	-217.40	-79.98	307.38
12.500	2	-190.59	-94.55	-43.22	-743.75	-5.67	388.89
36.000	3	-68.29	18.21	28.09	-289.37	114.32	160.39
52.001	4	-27.93	-2.44	-.97	-452.62	181.12	217.76

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 15 CM - REVEST 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	15.000	110.31	111.42	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		60.05	60.05	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1139.02	1434.89	-135.61	.00	9.56	.00
17.500	2	-42.12	-34.25	-107.56	.00	13.39	.00
41.000	3	12.30	17.24	-43.61	.00	13.56	.00
57.001	4	-3.18	-1.98	-22.32	.00	3.16	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	171.07	270.93	-259.12	-16.016	.000	512.307
17.500	2	131.04	229.93	-691.12	-17.734	.000	453.604
41.000	3	76.18	99.20	-184.76	-12.570	.000	378.606
57.001	4	129.20	158.02	-332.98	-21.113	.000	347.515

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-135.69	1139.09	1434.89	-259.14	171.09	270.93
17.500	2	-110.19	-39.49	-34.25	-724.23	164.15	229.93
41.000	3	-46.73	15.42	17.24	-199.30	90.72	99.20
57.001	4	-22.83	-2.67	-1.98	-345.29	141.51	158.02

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	500.68	1222.83	-130.19	.00	.00	.00
17.500	2	-50.08	-38.29	-114.69	.00	.00	.00
41.000	3	14.12	17.88	-48.27	.00	.00	.00
57.001	4	-2.86	-2.08	-23.84	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	29.56	273.29	-183.35	.000	.000	528.115
17.500	2	99.74	247.88	-712.10	.000	.000	471.886
41.000	3	87.60	105.12	-203.56	.000	.000	390.677
57.001	4	146.67	165.45	-360.05	.000	.000	356.836

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-130.19	500.68	1222.83	-183.35	29.56	273.29
17.500	2	-114.69	-50.08	-38.29	-712.10	99.74	247.88
41.000	3	-48.27	14.12	17.88	-203.56	87.60	105.12
57.001	4	-23.84	-2.86	-2.08	-360.05	146.67	165.45

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 25 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	25.000	134.89	135.26	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		59.78	59.78	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	1869.48	2253.11	-289.78	.00	9.08	.00
17.500	2	-44.01	-24.81	-162.35	.00	19.44	.00
46.000	3	15.36	21.83	-46.33	.00	15.53	.00
62.001	4	-2.59	-1.23	-22.00	.00	3.34	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	295.58	425.05	-433.17	-10.686	.000	663.353
17.500	2	228.11	426.82	-996.75	-27.511	.000	504.184
46.000	3	83.85	114.06	-204.02	-13.974	.000	372.913
62.001	4	131.56	164.54	-339.29	-21.644	.000	340.230

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-289.82	1869.52	2253.11	-433.18	295.59	425.05
17.500	2	-165.46	-40.90	-24.81	-1028.97	260.33	426.82
46.000	3	-50.02	19.04	21.83	-221.23	101.07	114.06
62.001	4	-22.56	-2.03	-1.23	-352.82	145.09	164.54

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-441.15	1335.56	-200.15	.00	.00	.00
17.500	2	-58.60	-26.98	-164.95	.00	.00	.00
46.000	3	17.82	22.98	-51.77	.00	.00	.00
62.001	4	-2.18	-1.27	-23.62	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-209.64	390.00	-128.30	.000	.000	648.162
17.500	2	134.31	461.66	-966.42	.000	.000	525.693
46.000	3	97.79	121.85	-226.95	.000	.000	385.573
62.001	4	150.81	173.06	-369.15	.000	.000	349.722

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-441.15	-200.15	1335.56	-209.64	-128.30	390.00
17.500	2	-164.95	-58.60	-26.98	-966.42	134.31	461.66
46.000	3	-51.77	17.82	22.98	-226.95	97.79	121.85
62.001	4	-23.62	-2.18	-1.27	-369.15	150.81	173.06

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 25 CM - REVEST. 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	25.000	87.94	88.25	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		61.39	61.39	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1294.73	1626.70	-118.59	.00	7.89	.00
22.500	2	-29.62	-23.20	-84.34	.00	10.42	.00
51.000	3	10.96	14.01	-34.34	.00	9.78	.00
67.001	4	-3.08	-2.28	-19.48	.00	2.48	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	191.72	303.76	-285.27	-19.463	.000	545.424
22.500	2	151.75	253.72	-716.33	-24.446	.000	440.246
51.000	3	63.64	77.87	-147.75	-10.377	.000	345.572
67.001	4	109.32	128.31	-278.09	-17.619	.000	319.855

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-118.63	1294.77	1626.70	-285.29	191.74	303.76
22.500	2	-86.26	-27.71	-23.20	-746.75	182.17	253.72
51.000	3	-36.36	12.98	14.01	-157.19	73.08	77.87
67.001	4	-19.85	-2.71	-2.28	-286.73	117.96	128.31

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	673.24	1431.24	-114.94	.00	.00	.00
22.500	2	-32.76	-25.62	-92.43	.00	.00	.00
51.000	3	12.43	14.48	-37.39	.00	.00	.00
67.001	4	-2.86	-2.37	-20.58	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	53.13	308.96	-212.88	.000	.000	566.122
22.500	2	163.81	277.15	-782.75	.000	.000	459.681
51.000	3	72.00	81.53	-160.52	.000	.000	354.766
67.001	4	121.62	133.18	-296.86	.000	.000	327.148

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-114.94	673.24	1431.24	-212.88	53.13	308.96
22.500	2	-92.43	-32.76	-25.62	-782.75	163.81	277.15
51.000	3	-37.39	12.43	14.48	-160.52	72.00	81.53
67.001	4	-20.58	-2.86	-2.37	-296.86	121.62	133.18

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 35 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	35.000	106.00	106.09	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		61.06	61.06	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	2180.90	2655.82	-265.45	.00	9.92	.00
22.500	2	-30.56	-15.07	-126.01	.00	17.58	.00
56.000	3	13.87	18.02	-36.52	.00	11.52	.00
72.001	4	-2.46	-1.51	-19.19	.00	2.66	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	336.07	496.35	-489.58	-15.045	.000	739.167
22.500	2	243.89	448.29	-1015.74	-37.020	.000	494.909
56.000	3	70.90	90.25	-164.24	-11.699	.000	339.923
72.001	4	112.35	134.86	-285.14	-18.251	.000	312.706

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-265.49	2180.94	2655.82	-489.59	336.08	496.35
22.500	2	-129.14	-27.42	-15.07	-1057.11	285.25	448.29
56.000	3	-39.02	16.38	18.02	-175.94	82.60	90.25
72.001	4	-19.61	-2.04	-1.51	-294.93	122.14	134.86

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-244.40	1707.45	-194.95	.00	.00	.00
22.500	2	-36.28	-16.71	-136.54	.00	.00	.00
56.000	3	15.91	18.83	-40.28	.00	.00	.00
72.001	4	-2.16	-1.56	-20.40	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-193.44	465.31	-176.76	.000	.000	733.260
22.500	2	235.90	494.08	-1087.30	.000	.000	522.534
56.000	3	81.62	95.25	-180.56	.000	.000	349.710
72.001	4	126.45	140.65	-306.60	.000	.000	320.216

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-244.40	-194.95	1707.45	-193.44	-176.76	465.31
22.500	2	-136.54	-36.28	-16.71	-1087.30	235.90	494.08
56.000	3	-40.28	15.91	18.83	-180.56	81.62	95.25
72.001	4	-20.40	-2.16	-1.56	-306.60	126.45	140.65

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: BGS 15 CM - REVET. 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	35.000	73.91	72.92	62.65	.893
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		62.58	62.59	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1430.39	1788.27	-106.32	.00	7.49	.00
27.500	2	-21.25	-16.35	-68.54	.00	8.43	.00
61.000	3	9.70	11.68	-27.87	.00	7.14	.00
77.001	4	-2.98	-2.42	-17.12	.00	1.95	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	210.43	331.21	-308.21	-22.558	.000	590.128
27.500	2	174.28	268.39	-733.79	-29.367	.000	434.606
61.000	3	53.92	63.17	-121.41	-8.672	.000	318.172
77.001	4	92.86	105.81	-234.65	-14.794	.000	296.571

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-106.35	1430.43	1788.27	-308.22	210.44	331.21
27.500	2	-70.00	-19.79	-16.35	-761.79	202.28	268.39
61.000	3	-29.18	11.01	11.68	-127.52	60.03	63.17
77.001	4	-17.38	-2.72	-2.42	-240.78	98.99	105.81

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	823.11	1605.62	-103.57	.00	.00	.00
27.500	2	-22.26	-17.74	-75.24	.00	.00	.00
61.000	3	10.80	12.03	-29.88	.00	.00	.00
77.001	4	-2.84	-2.51	-17.92	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	74.35	338.45	-238.41	.000	.000	615.467
27.500	2	204.73	291.62	-812.44	.000	.000	454.145
61.000	3	59.80	65.54	-130.03	.000	.000	325.259
77.001	4	101.57	109.12	-247.86	.000	.000	302.334

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-103.57	823.12	1605.62	-238.41	74.35	338.45
27.500	2	-75.24	-22.26	-17.74	-812.44	204.73	291.62
61.000	3	-29.88	10.80	12.03	-130.03	59.80	65.54
77.001	4	-17.92	-2.84	-2.51	-247.86	101.57	109.12

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 15 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	15.000	98.98	99.04	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		57.58	57.57	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	2066.25	2498.24	-272.18	.00	6.09	.00
17.500	2	-77.44	-66.07	-169.75	.00	22.63	.00
46.000	3	46.65	55.79	-37.52	.00	13.35	.00
62.001	4	-2.65	-1.24	-23.05	.00	3.48	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	321.78	467.58	-467.44	-11.758	.000	723.483
17.500	2	170.55	331.25	-1134.38	-16.721	.000	527.221
46.000	3	131.16	173.78	-261.66	-21.836	.000	425.046
62.001	4	143.96	179.25	-370.00	-23.647	.000	367.193

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-272.19	2066.27	2498.24	-467.44	321.79	467.58
17.500	2	-175.00	-72.19	-66.07	-1208.60	244.77	331.25
46.000	3	-39.59	48.72	55.79	-271.31	140.81	173.77
62.001	4	-23.63	-2.07	-1.24	-384.52	158.47	179.25

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-429.15	1504.55	-206.72	.00	.00	.00
17.500	2	-92.27	-70.95	-173.12	.00	.00	.00
46.000	3	53.39	60.24	-41.39	.00	.00	.00
62.001	4	-2.23	-1.28	-24.73	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-220.85	431.78	-145.78	.000	.000	706.966
17.500	2	54.09	355.49	-1088.78	.000	.000	549.863
46.000	3	152.85	184.78	-289.46	.000	.000	440.987
62.001	4	164.66	188.36	-402.07	.000	.000	377.457

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-429.15	-206.72	1504.55	-220.85	-145.78	431.78
17.500	2	-173.12	-92.27	-70.95	-1088.78	54.09	355.49
46.000	3	-41.39	53.39	60.24	-289.46	152.85	184.78
62.001	4	-24.73	-2.23	-1.28	-402.07	164.66	188.36

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 15 CM - REVET. 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	15.000	73.33	73.39	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		59.83	59.83	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1284.17	1614.94	-119.82	.00	6.56	.00
17.500	2	-44.50	-38.47	-100.07	.00	10.58	.00
41.000	3	8.63	13.10	-44.74	.00	13.27	.00
57.001	4	-4.07	-2.89	-23.76	.00	3.24	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	190.22	301.85	-283.63	-19.009	.000	557.453
17.500	2	148.78	263.71	-911.29	-20.810	.000	481.501
41.000	3	70.94	91.82	-178.11	-11.716	.000	395.832
57.001	4	132.40	161.08	-344.83	-21.616	.000	364.659

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-119.85	1284.21	1614.94	-283.64	190.23	301.85
17.500	2	-102.01	-42.55	-38.47	-948.41	185.90	263.71
41.000	3	-47.86	11.74	13.10	-192.66	85.50	91.82
57.001	4	-24.28	-3.55	-2.89	-357.42	144.99	161.08

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	647.97	1411.82	-119.56	.00	.00	.00
17.500	2	-51.52	-42.91	-108.14	.00	.00	.00
41.000	3	10.14	13.46	-49.38	.00	.00	.00
57.001	4	-3.80	-3.04	-25.35	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	48.92	306.72	-210.12	.000	.000	577.246
17.500	2	121.21	285.58	-958.84	.000	.000	501.805
41.000	3	81.70	97.19	-196.08	.000	.000	408.499
57.001	4	150.10	168.46	-372.36	.000	.000	374.610

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-119.56	647.97	1411.82	-210.12	48.92	306.72
17.500	2	-108.14	-51.52	-42.91	-958.84	121.21	285.58
41.000	3	-49.38	10.14	13.46	-196.08	81.70	97.19
57.001	4	-25.35	-3.80	-3.04	-372.36	150.10	168.46

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 25 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	25.000	82.67	82.68	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		59.14	59.14	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	2393.78	2937.64	-247.64	.00	6.83	.00
17.500	2	-48.44	-31.60	-154.17	.00	16.54	.00
46.000	3	11.84	18.29	-50.36	.00	16.44	.00
62.001	4	-3.61	-2.15	-24.53	.00	3.64	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	363.07	546.62	-528.41	-17.269	.000	803.551
17.500	2	312.80	598.05	-1477.38	-41.453	.000	578.489
46.000	3	82.23	112.33	-208.04	-13.782	.000	402.738
62.001	4	142.04	177.73	-370.99	-23.410	.000	368.212

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-247.65	2393.80	2937.64	-528.41	363.08	546.62
17.500	2	-156.70	-45.92	-31.60	-1520.15	355.57	598.05
46.000	3	-54.44	15.92	18.29	-227.08	101.27	112.33
62.001	4	-25.15	-2.99	-2.15	-386.07	157.11	177.73

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	-149.21	1951.90	-194.97	.00	.00	.00
17.500	2	-60.22	-35.10	-162.68	.00	.00	.00
46.000	3	14.17	19.18	-56.30	.00	.00	.00
62.001	4	-3.21	-2.25	-26.35	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-191.03	518.09	-206.48	.000	.000	800.581
17.500	2	228.46	653.83	-1506.37	.000	.000	608.126
46.000	3	96.73	120.10	-232.13	.000	.000	417.009
62.001	4	163.26	186.95	-404.00	.000	.000	379.077

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-194.97	-149.21	1951.90	-206.48	-191.03	518.09
17.500	2	-162.68	-60.22	-35.10	-1506.37	228.46	653.83
46.000	3	-56.30	14.17	19.18	-232.13	96.73	120.10
62.001	4	-26.35	-3.21	-2.25	-404.00	163.26	186.95

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 25 CM - REVEST. 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	25.000	63.77	63.79	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		61.28	61.28	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1433.75	1795.50	-105.40	.00	5.94	.00
22.500	2	-30.41	-25.14	-79.20	.00	8.56	.00
51.000	3	8.38	11.15	-35.03	.00	9.47	.00
67.001	4	-3.80	-3.01	-20.51	.00	2.50	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	210.55	332.64	-308.91	-22.504	.000	598.069
22.500	2	177.66	293.15	-893.30	-28.993	.000	469.991
51.000	3	59.76	72.71	-142.80	-9.733	.000	359.315
67.001	4	110.77	129.35	-284.71	-17.824	.000	333.663

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-105.42	1433.78	1795.50	-308.92	210.56	332.64
22.500	2	-80.66	-28.95	-25.14	-925.31	209.66	293.15
51.000	3	-37.00	10.35	11.15	-152.02	68.98	72.71
67.001	4	-20.88	-3.43	-3.01	-293.35	119.41	129.35

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	821.30	1611.19	-104.55	.00	.00	.00
22.500	2	-33.25	-27.61	-86.81	.00	.00	.00
51.000	3	9.64	11.47	-37.99	.00	.00	.00
67.001	4	-3.61	-3.14	-21.63	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	73.49	340.08	-238.98	.000	.000	623.113
22.500	2	196.30	320.05	-979.34	.000	.000	491.372
51.000	3	67.50	76.04	-154.79	.000	.000	368.785
67.001	4	122.94	134.11	-303.37	.000	.000	341.292

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-104.55	821.30	1611.19	-238.98	73.49	340.08
22.500	2	-86.81	-33.25	-27.61	-979.34	196.31	320.05
51.000	3	-37.99	9.64	11.47	-154.79	67.50	76.04
67.001	4	-21.63	-3.61	-3.14	-303.37	122.94	134.11

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 35 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	5.000	4000.00			
2	.40	35.000	71.62	71.63	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		60.58	60.58	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	2644.68	3265.16	-231.88	.00	8.79	.00
22.500	2	-32.48	-18.65	-121.45	.00	15.55	.00
56.000	3	11.47	15.57	-39.20	.00	11.97	.00
72.001	4	-3.27	-2.27	-21.06	.00	2.84	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	395.76	605.17	-575.08	-21.856	.000	891.516
22.500	2	328.85	599.31	-1410.05	-51.954	.000	568.579
56.000	3	69.73	88.88	-166.72	-11.533	.000	363.565
72.001	4	119.40	143.22	-306.54	-19.406	.000	335.121

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-231.91	2644.71	3265.16	-575.09	395.77	605.17
22.500	2	-124.09	-29.84	-18.65	-1461.66	380.45	599.31
56.000	3	-41.89	14.16	15.57	-179.26	82.27	88.88
72.001	4	-21.51	-2.83	-2.27	-317.14	130.00	143.22

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
4.999	1	76.84	2287.90	-186.85	.00	.00	.00
22.500	2	-37.12	-20.75	-133.28	.00	.00	.00
56.000	3	13.40	16.25	-43.16	.00	.00	.00
72.001	4	-2.99	-2.37	-22.38	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
4.999	1	-164.63	581.60	-253.63	.000	.000	901.251
22.500	2	342.01	661.88	-1537.63	.000	.000	604.539
56.000	3	80.54	93.83	-183.39	.000	.000	374.320
72.001	4	134.48	149.35	-329.60	.000	.000	343.493

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
4.999	1	-186.85	76.84	2287.90	-253.63	-164.63	581.60
22.500	2	-133.28	-37.12	-20.75	-1537.63	342.01	661.87
56.000	3	-43.16	13.40	16.25	-183.39	80.54	93.83
72.001	4	-22.38	-2.99	-2.37	-329.60	134.48	149.35

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: RCD 35 CM - REVEST. 10 CM

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.35	10.000	4000.00			
2	.40	35.000	57.11	57.11	53.00	.510
3	.40	32.000	300.00			
4	.45		62.57	62.57	46.56	-.169

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

No of Iteration: 4

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	1548.74	1929.46	-96.33	.00	6.18	.00
27.500	2	-21.59	-17.37	-65.23	.00	7.27	.00
61.000	3	8.01	9.84	-28.32	.00	6.92	.00
77.001	4	-3.49	-2.94	-17.80	.00	1.96	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	226.78	355.28	-328.42	-25.224	.000	642.255
27.500	2	200.47	303.91	-869.25	-33.830	.000	462.098
61.000	3	51.32	59.89	-118.19	-8.244	.000	327.982
77.001	4	93.40	106.06	-238.19	-14.860	.000	306.469

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-96.35	1548.76	1929.46	-328.43	226.79	355.28
27.500	2	-66.41	-20.41	-17.37	-898.16	229.38	303.91
61.000	3	-29.59	9.28	9.84	-124.14	57.26	59.89
77.001	4	-18.06	-3.23	-2.94	-244.27	99.48	106.06

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
9.999	1	951.21	1756.69	-95.21	.00	.00	.00
27.500	2	-22.57	-18.76	-71.39	.00	.00	.00
61.000	3	8.98	10.11	-30.27	.00	.00	.00
77.001	4	-3.37	-3.05	-18.61	.00	.00	.00

Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
9.999	1	92.42	364.27	-260.74	.000	.000	671.514
27.500	2	236.29	329.54	-960.55	.000	.000	483.297
61.000	3	56.81	62.09	-126.35	.000	.000	335.208
77.001	4	101.96	109.28	-251.25	.000	.000	312.412

Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
9.999	1	-95.21	951.21	1756.69	-260.74	92.42	364.27
27.500	2	-71.39	-22.57	-18.76	-960.55	236.29	329.54
61.000	3	-30.27	8.98	10.11	-126.35	56.81	62.09
77.001	4	-18.61	-3.37	-3.05	-251.25	101.96	109.28

ANEXO B– Tensões localizadas na estrutura do pavimento obtidas com o auxílio do *software Everstress 5.0*

Profundidade de Análise				Resultados - Everstress																							
CA	F RA	CCG - B	CCG - SB	DP - SL	Material	FADIGA						CISALHAMENTO BASE						CISALHAMENTO SUB- BASE						TOPO DO SBL			
						Exx(0,0)	Eyy(0,0)	Exx(15,0)	Eyy(15,0)	Ew(15,0)	S1(0,0)	S3(0,0)	Ezz(0,0)	S1(15,0)	S3(15,0)	Ezz(15,0)	S1(0,0)	S3(0,0)	Ezz(0,0)	S1(15,0)	S3(15,0)	Ezz(15,0)	Ezz(0,0)	Ezz(15,0)			
5 CM	4,999	12,5	36,0	52	BGS	249,84	345,49	217,40	307,38	307,38	222,64	44,03	968,73	190,59	43,22	743,75	66,58	26,44	261,81	68,29	28,09	289,37	411,74	452,62			
10 CM	9,999	17,5	41,0	57	15 CM	171,07	270,93	29,56	273,29	273,29	110,19	34,49	691,12	114,69	38,29	712,10	46,73	17,24	184,76	48,27	17,88	203,56	332,98	360,05			
5 CM	4,999	17,5	46,0	62	BGS	321,78	467,58	220,85	431,78	431,78	175,00	66,07	1.134,38	173,12	70,95	1.088,78	68,28	9,88	636,27	72,19	10,42	711,59	370,00	407,07			
10 CM	9,999	22,5	51,0	67	25 CM	190,22	301,85	48,92	306,72	306,72	102,01	38,47	911,29	108,14	42,91	958,84	47,86	13,10	178,11	49,38	13,46	196,08	344,83	372,36			
5 CM	4,999	22,5	56,0	72	BGS	295,58	425,05	209,64	390,00	390,00	165,46	24,81	996,75	164,95	26,98	966,42	50,02	21,83	204,02	51,77	22,98	226,95	339,29	369,15			
10 CM	9,999	27,5	61,0	77	35 CM	191,72	303,76	53,13	308,96	308,96	86,26	23,20	716,33	92,43	25,62	782,75	36,36	14,01	147,75	37,39	14,48	160,52	278,09	296,86			
5 CM	4,999	12,5	36,0	52	RCD	363,07	546,62	191,03	518,09	518,09	156,70	31,60	1.477,38	162,68	35,10	1.506,37	54,44	18,29	208,99	56,30	19,18	232,13	370,99	404,00			
10 CM	9,999	17,5	41,0	57	15 CM	210,55	332,64	73,49	340,06	340,06	80,66	25,14	893,30	86,81	27,61	979,34	37,00	11,15	142,80	37,99	11,47	154,79	284,71	303,37			
5 CM	4,999	17,5	46,0	62	RCD	336,07	496,35	193,44	465,31	465,31	129,14	15,07	1.015,74	136,54	16,71	1.087,30	39,02	18,02	164,24	40,28	18,83	180,56	285,14	306,60			
10 CM	9,999	22,5	51,0	67	25 CM	210,43	331,21	74,35	338,35	338,35	70,00	16,35	733,79	75,24	17,74	812,44	29,18	11,68	121,41	29,88	12,03	130,03	234,65	247,86			
5 CM	4,999	22,5	56,0	72	RCD	395,76	605,17	164,63	581,60	581,60	124,09	18,65	1.410,05	133,28	20,75	1.537,63	41,89	15,57	166,72	43,16	16,25	183,39	306,54	329,60			
10 CM	9,999	27,5	61,0	77	35 CM	226,78	355,28	92,42	364,27	364,27	66,41	17,37	869,25	71,39	18,76	960,55	29,59	9,84	118,19	30,27	10,11	126,35	238,19	251,25			