VINÍCIUS MARÓSTICA ALBERTO

Contribuição à Avaliação da Ecoeficiência na Escolha de Estruturas de Pavimento Flexíveis, Semirrígidas ou Invertidas

São Paulo

2018

VINÍCIUS MARÓSTICA ALBERTO

Contribuição à Avaliação da Ecoeficiência na Escolha de Estruturas de Pavimento Flexíveis, Semirrígidas ou Invertidas

Versão Corrigida

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

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki

São Paulo

2018

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

São Paulo, ..10.. de ..DEZEMBRO...de 2018

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

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

Catalogação na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade de São Paulo

Alberto, Vinícius Maróstica
Contribuição à Avaliação da Ecoeficiência na Escolha de Estruturas de Pavimento Flexíveis, Semirrígidas ou Invertidas / V. M. Alberto -- São Paulo, 2018.
192 p.

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

1.Pavimentos Asfálticos 2.Rodovias 3.Efeito Estufa 4.Desenvolvimento Sustentável I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

ALBERTO, Vinícius Maróstica. **Contribuição à Avaliação da Ecoeficiência na Escolha de Estruturas de Pavimento Flexíveis, Semirrígidas ou Invertidas.** 2018. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Aprovado em: 26 de outubro de 2018

Banca Examinadora

Prof. Dr.: CARLOS YUKIO SUZUKI

Instituição: ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Julgamento: APROVADO

Prof. Dr.: CAIO RUBENS GONÇALVES SANTOS

Instituição: INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

Julgamento: APROVADO

Dr.: ANDRÉ FELIPE VALE

Instituição: ROADRUNNER

Julgamento: APROVADO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki, não só por todos os ensinamentos conselhos e motivação que por vezes ultrapassaram o ambiente acadêmico, mas por toda paciência e confiança depositada.

Ao amigo Prof. Dr. Caio Rubens Gonçalves Santos que me acompanha desde a graduação e teve papel importante tanto com valiosas sugestões para elaboração deste trabalho, quanto por me abrir as portas para a Engenharia de Transportes e contribuir de forma majoritária para minha formação acadêmica e profissional.

Estendo os agradecimentos à amiga Prof.ª Msc. Flaviane Melo Lopes Vallejo, também por todas as sugestões, dicas e direcionamentos que elevaram a qualidade deste trabalho e, obviamente, por toda paciência principalmente nos não tão divertidos momentos de desespero com os prazos de entrega.

À Planservi Engenharia e todos os colegas, por todo aprendizado, confiança e incentivo à busca do conhecimento.

Aos colegas de PTR e Planservi Ângela Azevedo, Marcelo Costa, Raphael Daibert e, em especial, Gabriel Lima, com quem dividi boa parte do sofrimento e alegrias desta jornada.

Aos amigos de fora da engenharia, Caio e Natália Milhorati por todo apoio e motivação de sempre.

Agradeço a todos os meus familiares que me acompanharam durante esta jornada, mas em especial às minhas irmãs Anna Carolina e Gabriella, por serem as irmãs que todo irmão gostaria de ter e para meus avós Iraci, Alberto, Helena e, como não poderia faltar, ao Sr. Décio, que, mesmo sem ter concluído o ensino fundamental conseguiu me ensinar mais em 20 anos do qualquer professor, escola e universidade jamais foi capaz de ensinar.

Pelo amor incondicional, pela dedicação de uma vida e pelos incontáveis passeios as livrarias, toda a gratidão do mundo àqueles que me ensinaram o verdadeiro valor do conhecimento, meus amados pais Márcio Alberto e Cilene Regina Maróstica Alberto que, apesar de não entenderem meu apreço pelas ciências exatas, em nenhum momento deixaram de me dar suporte e fazer o impossível para que eu pudesse seguir com meus planos, quaisquer que eles sejam.

Por fim, porque o melhor vem sempre no final, àquela que dividiu comigo todos os momentos nos últimos 14 anos, sejam eles difíceis, de alegria ou simplesmente comuns. Agradeço a minha melhor amiga, namorada e esposa, Juliana, por todo amor, companheirismo, paciência e por constantemente me lembrar na forma mais pura de quem somos, independente dos títulos profissionais e acadêmicos.

“Making your ideas accessible is not the same as dumbing it down.”

Melissa Marshall

“Make everything as simple as possible, but no simpler.”

Albert Einstein

RESUMO

ALBERTO, Vinícius Maróstica. **Contribuição à Avaliação da Ecoeficiência na Escolha de Estruturas de Pavimento Flexíveis, Semirrígidas ou Invertidas.** 2018. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

A seleção do tipo de pavimento é baseada atualmente no país considerando-se os custos de implantação e manutenção e o atendimento às normas técnicas, ou seja, a escolha é feita por meio de análise técnico-econômica. Órgãos federais, estaduais e municipais não preveem avaliação quantitativa do consumo de energia e da emissão de poluentes atmosféricos, utilizando somente o fator econômico como parâmetro decisivo sobre duas ou mais alternativas de estruturas de pavimento. Construções e reconstruções de pavimentos consomem um grande volume de energia tanto para obtenção e processamentos dos materiais quanto na aplicação e execução propriamente dita dos serviços. Tendo em vista a necessidade de considerar aspectos de sustentabilidade na escolha entre diferentes tipos de solução de pavimento, buscou-se avaliar a emissão de poluentes e consumo de energia e água para a fase de implantação do pavimento. Para tal foi avaliada a utilização de diferentes programas computacionais capazes de avaliar a questão ambiental qualitativamente, como o Greenroads™ e o GreenPave, e quantitativamente, o GaBi, DuboCalc, VTTI/UC, ECORCE-M e PaLATE. Este último foi o escolhido para elaboração deste estudo sendo utilizado em análise unitária o que permitiu a elaboração de gráfico de impressão digital ambiental. São apresentados estudos de caso em três metodologias diferentes sendo que a última delas sugere a análise de três matrizes de solução totalizando mais de 230 mil casos que levam a obtenção de três equações de previsão das emissões de CO_2 em função do tráfego, condição de suporte do subleito e número estrutural. Ao final, é sugerida a inserção da parcela ambiental na análise para escolha dos pavimentos com a utilização das ferramentas propostas, ou seja, as equações de previsão de emissões de CO_2 e o gráfico de impressão digital ambiental.

Palavras-chave: Pavimentos. Emissão de GEE. Desenvolvimento Sustentável. Avaliação da ecoeficiência.

ABSTRACT

ALBERTO, Vinícius Maróstica. **Contribution to the ecoeficiency evaluation on the Pavement Structure Type Choice.** 2018. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

The pavement structure selection in Brazil nowadays is based considering the costs of construction and maintenance and the check against design standards, in other words, the choice is made by a technical-economic analysis. Brazilian Federal agencies do not provide standards for a quantitative assessment of energy consumption and atmospheric pollutants emission, using only the economic factor as a decision parameter on two or more pavement structures. Pavement construction and reconstruction of pavement structures consume a large volume of energy while obtaining, processing and applying materials during paving services. Considering the need to account aspects of sustainability in the choice between different types of pavement solution, it was sought to evaluate the emission of pollutants and energy and water consumption for the pavement construction phase. In order to do so, it was evaluated the use of different softwares capable of account the environmental question qualitatively, such as the Greenroads™ and GreenPave, and quantitatively, such as GaBi, DuboCalc, VTTI / UC, ECORCE-M and PaLATE. PaLATE was chosen to be software used in this study being used in unitary analysis that allowed the elaboration of environmental fingerprint graph. Case studies are presented in three different methodologies. The last suggests the analysis of three solution matrices totaling more than 230 thousand cases that leads to obtaining three prediction equations of CO_2 emissions as a function of traffic, subgrade support condition and structural number. At the end, it is suggested the insertion of the environmental part in the pavement choose analysis with the use of the proposed tools, the CO_2 forecasting emission equations and the environmental fingerprint graph.

Keywords: Flexible pavements. GHG Emissions. Sustainable Development. Eco-efficiency evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de instalação de britagem típica (Adaptado de ROBERTS *et al.*, 1996) 32
Figura 2.2 – Esquema de petróleo com diferentes tipos de densidade e seus subprodutos (Adaptado de ROBERTS et. al, 1996) 35
Figura 2.3 – Processo de obtenção de CAP com destilação única a vácuo (BERNUCCI *et al.*, 2008) 36
Figura 2.4 – Processo de obtenção de CAP com destilação atmosférica e destilação a vácuo (BERNUCCI *et al.*, 2008) 36
Figura 2.5 – Esquema das camadas da atmosfera e principais parâmetros (MOZETO, 2001) 40
Figura 2.6 – Série histórica de emissão de CO_2 (NASA, 2013) 41
Figura 2.7 – Ordem de grandeza de materiais particulados PM_{10} (ANDRADE, 2011) 42
Figura 2.8 – Reconstrução da Rua Asotin (GREENROADS, 2018) 49
Figura 2.9 – Reconstrução da Rua Cheyenne (GREENROADS, 2018) 50
Figura 2.10 – Ampliação da Estrada 77 - Israel (GREENROADS, 2018) 51
Figura 3.1 – Ciclo de Vida do Pavimento (HORVATH, 2004a) 53
Figura 3.2 – Principais referências utilizadas na compilação do PaLATE (adaptado de HORVATH, 2004a) 54
Figura 3.3 – Planilha *Design* 55
Figura 3.4 – Planilha *Initial Construction* 56
Figura 3.5 – Planilha *Equipment* 57
Figura 3.6 – *Environmental Fingerprints* (Saling et. al, 2002) 76
Figura 3.7 – *Environmental Fingerprints* aplicados a pavimentação (Miller e Bahia, 2009) 77
Figura 3.8 – Gráfico de Impressões Digitais Ambientais Sugerido 83
Figura 3.9 – Exemplo de Polígono 84
Figura 4.1 – Curvas para determinação da espessura do pavimento a partir do número de operações de projeto e CBR do pavimento (DNIT, 2006) 91
Figura 4.2 – Nomenclatura das camadas do pavimento (DNIT, 2006) 93
Figura 4.3 – Consumo de Energia (Metodologia 2) 122
Figura 4.4 – Consumo de Água (Metodologia 2) 122

Figura 4.5 – Emissão de CO_2 (Metodologia 2) 123
Figura 4.6 – Emissão de NO_X (Metodologia 2) 123
Figura 4.7 – Emissão de PM_{10} (Metodologia 2) 123
Figura 4.8 – Emissão de SO_2 (Metodologia 2) 124
Figura 4.9 – Emissão de CO (Metodologia 2) 124
Figura 4.10 – Emissão de Hg (Metodologia 2) 124
Figura 4.11 – Emissão de Pb (Metodologia 2) 125
Figura 4.12 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Flexível 131
Figura 4.13 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Semirrígido 132
Figura 4.14 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Invertido ... 133
Figura 5.1 – Fluxograma da Análise Estrutural-Econômica-Ambiental 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplo de Consumo de Energia e Emissão de CO_2 para materiais e serviços de pavimentação (Adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003).....30
Tabela 2.2 – Avaliação dos impactos ambientais no desmonte de rocha (Adaptado de PONTES *et al.*, 2013).....33
Tabela 2.3 – Exemplo de Consumo de Energia por tipo de material (adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003) 38
Tabela 2.4 – Exemplo de Emissão GEE por tipo de material (adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003) 38
Tabela 2.5 – Poluentes e principais danos ao meio ambiente e à saúde.....45
Tabela 3.1 – Descrições das Planilhas de Cálculo do PaLATE 55
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados para materiais compostos 62
Tabela 3.3 – Resultados da Análise Unitária no PaLATE (para 1,0 cm, 1 faixa e 1,0km) 63
Tabela 3.4 – Continuação dos Resultados da Análise Unitária no PaLATE (para 1,0 cm, 1 faixa e 1,0km) 63
Tabela 3.5 – Ranking dos materiais para o consumo de energia.....64
Tabela 3.6 – Ranking dos materiais para o consumo de água.....65
Tabela 3.7 – Ranking dos materiais para a emissão de CO_2 65
Tabela 3.8 – Ranking dos materiais para a emissão de NO_X.....66
Tabela 3.9 – Ranking dos materiais para a emissão de PM_{10}.....66
Tabela 3.10 – Ranking dos materiais para a emissão de SO_2 67
Tabela 3.11 – Ranking dos materiais para a emissão de CO 67
Tabela 3.12 – Ranking dos materiais para a emissão de Hg 68
Tabela 3.13 – Ranking dos materiais para a emissão de Pb 68
Tabela 3.14 – Índice de Ecoeficiência para o consumo de energia 71
Tabela 3.15 – Índice de Ecoeficiência para o consumo de água 71
Tabela 3.16 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de CO_2.....72
Tabela 3.17 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de NO_X 72
Tabela 3.18 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de PM_{10} 73
Tabela 3.19 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de SO_2.....73
Tabela 3.20 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de CO 74
Tabela 3.21 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de Hg.....74

Tabela 3.22 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de Pb 75
Tabela 3.23 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para o consumo de energia 78
Tabela 3.24 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para o consumo de água 79
Tabela 3.25 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de CO_2.....79
Tabela 3.26 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de NO_X 80
Tabela 3.27 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de PM_{10} 80
Tabela 3.28 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de SO_2.....81
Tabela 3.29 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de CO 81
Tabela 3.30 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de Hg.....82
Tabela 3.31 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de Pb 82
Tabela 3.32 – Ranking de Ecoeficiência dos Materiais Estudados 85
Tabela 3.33 – Estruturas adotadas 86
Tabela 4.1 – Características dos materiais utilizados 90
Tabela 4.2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso (DNIT, 2006) 93
Tabela 4.3 – Coeficiente de equivalência estrutural (DNIT, 2006) 93
Tabela 4.4 – Solução Base 95
Tabela 4.5 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Base).....95
Tabela 4.6 – Solução Alternativa 1.....96
Tabela 4.7 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 1) 96
Tabela 4.8 – Soluções Alternativas 2, 3 e 4 97
Tabela 4.9 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 2) 97
Tabela 4.10 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 3) 98
Tabela 4.11 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 4) 98
Tabela 4.12 – Soluções Alternativas 5, 6 e 7 99
Tabela 4.13 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 5) 99
Tabela 4.14 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 6) 99

Tabela 4.15 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 7) 100
Tabela 4.16 – Cálculo do SN 101
Tabela 4.17 – Consumo de Energia (Revestimento) 102
Tabela 4.18 – Consumo de Água (Revestimento) 102
Tabela 4.19 – Emissão de CO_2 (Revestimento) 102
Tabela 4.20 – Emissão de NO_X (Revestimento) 102
Tabela 4.21 – Emissão de PM_{10} (Revestimento) 102
Tabela 4.22 – Emissão de SO_2 (Revestimento) 102
Tabela 4.23 – Emissão de CO (Revestimento) 102
Tabela 4.24 – Emissão de Hg (Revestimento) 102
Tabela 4.25 – Emissão de Pb (Revestimento) 103
Tabela 4.26 – Consumo de Energia (Base) 103
Tabela 4.27 – Consumo de Água (Base) 103
Tabela 4.28 – Emissão de CO_2 (Base) 103
Tabela 4.29 – Emissão de NO_X (Base) 103
Tabela 4.30 – Emissão de PM_{10} (Base) 104
Tabela 4.31 – Emissão de SO_2 (Base) 104
Tabela 4.32 – Emissão de CO (Base) 104
Tabela 4.33 – Emissão de Hg (Base) 104
Tabela 4.34 – Emissão de Pb (Base) 104
Tabela 4.35 – Consumo de Energia (Sub-base) 105
Tabela 4.36 – Consumo de Água (Sub-base) 105
Tabela 4.37 – Emissão de CO_2 (Sub-base) 105
Tabela 4.38 – Emissão de NO_X (Sub-base) 105
Tabela 4.39 – Emissão de PM_{10} (Sub-base) 106
Tabela 4.40 – Emissão de SO_2 (Sub-base) 106
Tabela 4.41 – Emissão de CO (Sub-base) 106
Tabela 4.42 – Emissão de Hg (Sub-base) 106
Tabela 4.43 – Emissão de Pb (Sub-base) 106
Tabela 4.44 – Consumo de Energia (Geral) 107
Tabela 4.45 – Consumo de Água (Geral) 107
Tabela 4.46 – Emissão de CO_2 (Geral) 107
Tabela 4.47 – Emissão de NO_X (Geral) 107

Tabela 4.48 – Emissão de PM_{10} (Geral) 108
Tabela 4.49 – Emissão de SO_2 (Geral) 108
Tabela 4.50 – Emissão de CO (Geral) 108
Tabela 4.51 – Emissão de Hg (Geral) 108
Tabela 4.52 – Emissão de Pb (Geral) 109
Tabela 4.53 – Tipos de Tráfego Adotados 110
Tabela 4.54 – Condição de Suporte do Subleito 111
Tabela 4.55 – Características dos Materiais Utilizados 111
Tabela 4.56 – Matriz de Soluções 111
Tabela 4.57 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 1) 112
Tabela 4.58 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 2) 112
Tabela 4.59 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 3) 113
Tabela 4.60 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 4) 113
Tabela 4.61 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 5) 114
Tabela 4.62 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 6) 114
Tabela 4.63 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 7) 115
Tabela 4.64 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 8) 115
Tabela 4.65 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 9) 116
Tabela 4.66 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 10) 116
Tabela 4.67 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 11) 117
Tabela 4.68 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 12) 117

Tabela 4.69 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 13) 118
Tabela 4.70 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 14) 118
Tabela 4.71 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 15) 119
Tabela 4.72 – Resumo da Soluções 1 à 15 (Espessuras em cm) 119
Tabela 4.73 – Cálculo do SN 120
Tabela 4.74 – Emissões e Consumos – Metodologia 2 (Resultados por faixa, por km) 121
Tabela 4.75 – Matriz de Soluções - Flexível 126
Tabela 4.76 – Matriz de Soluções - Semirrígido 127
Tabela 4.77 – Matriz de Soluções - Invertido 128
Tabela 4.78 – Resultados da Retroanálise do Número N 129
Tabela 4.79 – Faixas de Valores de SNC Encontrados 129
Tabela 4.80 – Faixas de Emissão de CO_2 130
Tabela 5.1 – Estruturas dimensionadas 137
Tabela 5.2 – Emissões de CO_2 138
Tabela 5.3 – Custos para Pavimento Flexível – Alternativa Base 138
Tabela 5.4 – Custos para Pavimento Semirrígido – Alternativa 4 139
Tabela 5.5 – Custos para Pavimento Invertido – Alternativa 7 139
Tabela 5.6 – Custos das Emissões de CO_2 140
Tabela 5.7 – Ranking Análise Ambiental 141
Tabela 5.8 – Ranking Análise Econômica 141
Tabela 5.9 – Resumo Análise Técnico-Econômica-Ambiental 142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BGMC – Brita Graduada Melhorada com Cimento

BGS – Brita Graduada Simples

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – Índice de Suporte Califórnia

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CCP – Concreto de Cimento Portland

CCR – Concreto Compactado com Rolo

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP21 – 21ª Conferência das Partes

CPA – Camada Porosa de Atrito

DERSA – Desenvolvimento Rodoviário S.A.

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOTs – *Departments of Transportation*

EIA – Estudos de Impactos Ambientais

ETSU – *Energy Technology Support Unit*

GEE – Gases do Efeito Estufa

GHG – *Greenhouse Gases*

HMA – *Hot Mix Asphalt*

WMA – *Warm Mix Asphalt*

IE – Índice de Ecoeficiência

ICO2 – Índice Carbono Eficiente

iNDC – *Intended Nationally Determined Contribution*

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

LEED-ND – *Leadership in Energy and Environmental Design for Neighborhood Development*

LCPC - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MTO – *Ministry of Transpoprtation* (Ontário, Canadá)

ONU – Organização das Nações Unidas

PaLATE - *Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RIMA – Relatórios de Impactos ao Meio Ambiente

SC – Solo-Cimento

SICRO – Sistema de Custos Rodoviários

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SIURB – Secretaria de Infraestrutura Urbana da Prefeitura de São Paulo

SMA – *Stone Mastic Asphalt*

SMC – Solo Melhorado com Cimento

SN – *Structural Number*

TIR – Taxa Interna de Retorno

TRRL – *Transport and Road Research Laboratory*

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

VDM – Volume Diário Médio

LISTA DE SÍMBOLOS

CO – Monóxido de Carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

Hg – Mercúrio

NO – Óxido nítrico

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

NO_2 – Dióxido de nitrogênio

Pb – Chumbo

PM_{10} – Material Particulado

SO_2 – Dióxido de Enxofre

SO_x – Óxidos Sulfúricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23
1.1 Objetivos 26
1.2 Justificativa 26
1.3 Estruturação 28
2 REVISÂO BIBLIOGRÁFICA 30
2.1 CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE POLUENTES PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 30
2.1.1 Materiais 31
2.1.1.1 Agregados 31
2.1.1.2 Asfalto 32
2.1.2 Extração do Agregado e Transporte 32
2.1.3 Britagem e Gradação 34
2.1.4 Produção e Estocagem 34
2.1.5 Manufatura 37
2.1.6 Transporte 37
2.1.7 Consumo de Energia e Emissões Totais 37
2.1.8 Conclusões Parciais 39
2.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E AMBIENTAIS 40
2.2.1 Principais Poluentes 41
2.2.1.1 Dióxido de Carbono (CO_2) 41
2.2.1.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_X) 41
2.2.1.3 Materiais Particulados (PM_{10}) 42
2.2.1.4 Dióxido de Enxofre (SO_2) 43
2.2.1.5 Monóxido de Carbono (CO) 43
2.2.1.6 Mercúrio (Hg) 43
2.2.1.7 Chumbo (Pb) 44

2.2.2 Danos Atmosféricos, Ambientais e à Saúde 44
2.2.3 Conclusões Parciais 45
2.3 SOFTWARES PARA ANÁLISE AMBIENTAL 46
2.3.1 Softwares Qualitativos 46
2.3.2 Softwares Quantitativos 46
2.3.3 Projetos de Referência 48
2.3.3.1 Reconstrução da Rua Asotin - Tacoma, WA (EUA) 48
2.3.3.2 Reconstrução da Rua Cheyenne - Tacoma, WA (EUA) 49
2.3.3.3 Estrada 77 - Israel 50
3 MATERIAIS E MÉTODOS 52
3.1 SOFTWARE PaLATE 52
3.1.1 Histórico 52
3.1.2 Principais Aplicações e Limitações 53
3.1.3 Estrutura e Funcionamento 53
3.1.3.1 Dados do Projeto *(Design)* 55
3.1.3.2 Quantidades de Materiais de Construção e de Restauração (*Initial Construction / Maintence Construction*) 56
3.1.3.3 Dados dos Equipamentos (*Equipment*) 56
3.1.3.4 Custos (*Costs)* 57
3.1.3.5 Resultados dos Custos (*Costs Results*) 58
3.1.3.6 Resultados da Análise Ambiental (*Environmental Results*) 58
3.1.4 Deficiências do Programa 58
3.2 PALATE – ANÁLISE UNITÁRIA 60
3.2.1 Metodologia 60
3.2.2 Volumes Calculados 61
3.2.3 Emissão de Poluentes e Consumo de Energia 63
3.2.4 Resultados das Análises 64

3.2.5 Índices de Ecoeficiência 69
3.2.6 Análise de Ecoeficiência da BASF.....75
3.2.6.1 Impressão Digital Ambiental.....76
3.2.6.2 Sugestão: Gráfico de Impressão Digital Ambiental 77
3.2.6.3 Área das figuras geradas 84
3.2.7 Conclusões parciais da análise unitária.....87
4 ESTUDO DE CASO 89
4.1 METODOLOGIA 1: MESMAS CONDIÇÕES DE PROJETO.....89
4.1.1 Características do Projeto e dos materiais 90
4.1.2 Soluções Possíveis.....90
4.1.3 Dimensionamento.....91
4.1.4 Estruturas Dimensionadas.....95
4.1.4.1 Solução Base 95
4.1.4.2 Análise da Camada de Revestimento 96
4.1.4.3 Análise da Camada de Base 97
4.1.4.4 Análise da Camada de Sub-Base 99
4.1.5 Cálculo do SN.....100
4.1.6 Análise de Emissão de Poluentes e Consumo de Energia.....101
4.1.6.1 Análise da troca de revestimento 102
4.1.6.2 Análise da troca da base 103
4.1.6.3 Análise da troca da sub-base 105
4.1.6.4 Análise da geral das estruturas 107
4.1.7 Resultados Parciais 109
4.2 METODOLOGIA 2: DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROJETO 110
4.2.1 Características do Projeto e dos Materiais 110
4.2.2 Dimensionamento.....111
4.2.3 Cálculo do SN.....120

4.2.4 Análise de Emissão de Poluentes e Consumo de Energia 121
4.2.5 Resultados Parciais 125
4.3 METODOLOGIA 3: MATRIZ DE SOLUÇÕES 126
4.3.1 Definição das matrizes de estudo 126
4.3.2 Análise mecanicista e retroanalise do número N 128
4.3.3 Cálculo do SN 129
4.3.4 Cálculo das emissões de CO_2 130
4.3.5 Regressão Não Linear 130
5 CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA ESCOLHA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO 135
5.1 ANÁLISE ESTRUTURAL-ECONÔMICA-AMBIENTAL 135
5.1.1 Exemplo de Aplicação 137
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÔES 143
6.1 CONCLUSÔES 143
6.2 RECOMENDAÇÕES 145
6.2.1 Adaptação do PaLATE aos Padrões Brasileiros 145
6.2.2 Inclusão de Estruturas de Pavimento Rígido 145
6.2.3 Melhorias na Obtenção dos Materiais 145
6.2.4 Atualização do Gráfico de Impressão Digital Ambiental 146
6.2.5 Análise complementar incluindo o ciclo de vida útil do pavimento 146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 147
APÊNDICE A – VOLUMES DE MATERIAL INSERIDOS NO PALATE PARA ANÁLISE UNITÁRIA 152
APÊNDICE B – SAÍDAS DO PROGRAMA ELSYM-5 162
APÊNDICE C – VOLUMES DE MATERIAL INSERIDOS NO PALATE PARA O ESTUDO DE CASO – METODOLOGIA 1 184
APÊNDICE D – DADOS METODOLOGIA 3 DO ESTUDO DE CASO 187
APÊNDICE E – RESULTADOS DA REGRESSÃO NÃO LINEAR 188

ANEXO A – ÁBACOS PARA OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CAMADA ...189

1 INTRODUÇÃO

O uso de energia e a emissão de gases do efeito estufa (GEE), ou *Greenhouse gases* (GHG), tem recebido grande atenção da indústria nas duas últimas décadas principalmente com a crescente preocupação com o aumento da temperatura global culminando em grandes acordos entre as nações.

O Protocolo de Montreal de 1987 foi a primeira iniciativa global de impacto neste âmbito. Porém, o reconhecimento de que países desenvolvidos industrialmente são os principais responsáveis pelas emissões dos gases do efeito estufa, fez com que um novo protocolo buscasse ter um impacto maior nas nações com maior poder industrial seguindo o princípio de “Responsabilidades comuns, porém diferenciadas”. Proposto em 1997 e vigorado a partir de 2005, o Protocolo de Kyoto definiu metas de redução de emissões de poluentes que foram negociadas individualmente com cada país industrializado. Os países que aderiram (37 mais os da Comunidade Europeia) poderiam utilizar de três diferentes mecanismos para cumprir a meta de redução de poluentes, sendo estes: Comércio de Emissões, por meio da compra e venda de “créditos de carbono”; Implementação conjunta, que permite a junção de dois países que aderiram ao protocolo para atingir juntos as metas e; Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite que um país que aderiu ao protocolo invista em programas de redução de poluentes em países em desenvolvimento, a fim de atingir suas metas. A grande polêmica do Protocolo de Kyoto foi a não adesão dos Estados Unidos da América, principal responsável pelas emissões de GEE no mundo. O protocolo expirou em 2012 com um saldo positivo, porém não satisfatório, fato que fez com que as nações continuassem discutindo o tema até o surgimento do Acordo de Paris.

O Acordo de Paris foi adotado na 21ª Conferência das Partes (COP21) das Nações Unidas (ONU). Na ocasião, o acordo foi aprovado pelos 195 países pertencentes ao grupo, porém a efetivação do acordo depende da ratificação de países suficientes onde a soma de suas emissões seja de pelo menos 55% das emissões de GEE no mundo. Em abril de 2016 foi aberto o período de ratificação que se estendeu por um ano. O Acordo de Paris passou a vigorar ao final deste prazo pois na ocasião a ratificação atingiu o mínimo necessário de adesões incluindo potências fundamentais como EUA e China. Porém, em junho de 2017, o Presidente Donald Trump, recém

empossado, decidiu revogar a decisão de seu predecessor, ex-presidente Barack Obama, não só saindo do acordo como acabando com mais de 20 medidas ambientais vigentes nos EUA.

Segundo a ONU, o acordo de Paris previa o compromisso de manter o aumento da temperatura global em 1,5ºC acima dos níveis verificados antes de 1760, na época pré-revolução industrial (atualmente, o nível está acima de 2ºC). Para isto, cada país apresentou sua meta de contribuição em um documento denominado *intended Nationally Determined Contribution* (iNDC), onde estão descritas as intenções de redução de emissões de GEE de acordo com o que cada país pode economicamente suportar. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2016), o Brasil propôs em sua iNDC reduzir até 2025 as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 e até 2030 elevar esta redução para 43%, buscando assim reduzir drasticamente os impactos ambientais na próxima década.

O uso de termos como, Impactos ambientais, Desenvolvimento Sustentável, Eficiência Energética, Aquecimento Global, Efeito Estufa e Ecoeficiência, são cada vez mais frequentes dado o reconhecimento no meio científico e político da importância da preservação do meio ambiente.

O conceito de sustentabilidade em rodovias atualmente é discutido principalmente na utilização de materiais reciclados como base e sub-base de pavimentos, porém a questão vai além. Deve-se analisar criticamente todo o processo, considerando desde a obtenção e processamento dos materiais até o consumo de energia e emissão de poluentes pelos veículos que trafegam pela via, sendo que esta última depende diretamente da qualidade ao rolamento do pavimento em análise e das características geométricas da via.

Na construção civil de edifícios, a questão de sustentabilidade se encontra mais consolidada com auxílio de sistemas como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design)* que foi desenvolvido com intuito de auxiliar o projeto e a construção, visando minimizar os impactos ambientais. O sistema LEED-ND (Onde ND é a sigla para *Neighborhood Development*) inclui considerações básicas para a avaliação de impactos ambientais na pavimentação, porém não aprofunda a questão no que tange a avaliação direta de emissão de poluentes.

Todos os tipos de intervenções nos pavimentos requerem uma série de processos que, além de consumir energia, em sua maioria, emitem poluentes nocivos ao meio ambiente, fazendo com que análises econômicas e de ciclo de vida dos pavimentos sejam necessárias a fim de se obter parâmetros que auxiliem na tomada de decisões sobre executar ou não determinada intervenção.

Desta forma, a emissão de poluentes e consumo de energia em rodovias, pode ser dividida em dois grandes grupos: Serviços de construção e reabilitação e; Utilização da via.

Construções, reconstruções e reabilitações de pavimentos consomem um grande volume de energia tanto para obtenção e processamento dos materiais quanto na aplicação e execução propriamente dita dos serviços. Logo, devem ser computados os poluentes emitidos pelas máquinas e equipamentos utilizados assim como o consumo de energia e água. Neste grupo, softwares como *Greenroads™* e *PaLate* (*Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*) são capazes de calcular e comparar os parâmetros para diferentes tipos de intervenções e de situações. O software Greenroads foi desenvolvido com intuito de avaliar a sustentabilidade de rodovias. O software permite aos projetistas, construtores e órgãos públicos tomadas de decisões coesas provendo uma escala de desempenho de sustentabilidade para o projeto e construção da via. Para tal, o Greenroads, define atributos de sustentabilidade da rodovia, provê um sistema de avaliação de sustentabilidade da mesma e contempla uma coletânea de soluções e práticas sustentáveis tanto de projeto quanto de construção. Similar ao Greenroads, pode ser citado o GreenPave descrito no manual Canadense do MTO de 2013. Já o software PaLate é capaz de quantificar os poluentes emitidos e o consumo de energia com auxílio de amplas referências bibliográficas e catálogos de máquinas, materiais e tipos de serviço.

No segundo grupo, utilização da via, deve-se computar os poluentes emitidos e energia consumida pelos veículos que trafegam na mesma, o que não é parte do escopo deste trabalho uma vez que esta é influenciada diretamente pelo tipo de tráfego da via em questão e pelas condições operacionais dos veículos levando à necessidade de estudos mais específicos sobre estes assuntos.

Por fim, busca-se com estudos de caráter ambiental, alcançar o almejado desenvolvimento sustentável. Através de estudos multidisciplinares como o que é aqui

proposto, pretende-se derrubar a necessidade do adjetivo sustentável à palavra desenvolvimento para que, no futuro, a sustentabilidade esteja atrelada a palavra desenvolvimento em seu significado no dicionário.

1.1 Objetivos

Este trabalho busca propor ferramentas de avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes para auxiliar na escolha dos tipos de materiais sob a ótica ambiental na fase de elaboração do projeto de uma nova estrutura de pavimento.

Propõe-se, desta forma, a consideração de parcela ambiental para análise de estruturas de pavimento, para que a mesma possa ser acrescida na metodologia convencional de cunho técnico-econômico.

1.2 Justificativa

O Manual de Pavimentação, IPR-719 de 2006, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) cita, no capítulo 5, principais preocupações com o meio ambiente no projeto e nos serviços de pavimentação, enfatizando a importância de Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e dos respectivos Relatórios de Impactos ao Meio Ambiente (RIMA) que são de submissão obrigatória aos órgãos estaduais competentes segundo as resoluções CONAMA nº 001 (1986) e nº237 (1997). Ambas as resoluções não são específicas quanto aos estudos relacionados às atividades de pavimentação. No Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) a Instrução de Projeto IP-DE-S00/004 de 2007 (Elaboração do Plano Básico Ambiental para Licença Ambiental de Instalação) cita no capitulo 6, preocupações nos serviços de pavimentação com a qualidade do ar, porém apenas com caráter qualitativo. Nem o manual do DNIT no âmbito federal e nem a instrução de projeto de pavimentação IP-DE-P00/001 do DER-SP preveem formas de avaliação do impacto ambiental dos serviços de pavimentação, muito menos proveem uma metodologia que sirva como caráter de escolha de uma estrutura de pavimento.

Tomando o projeto e a obra do Trecho Norte do Rodoanel Mario Covas como referência, devido aos extensos e avançados estudos técnicos e à importância e tamanho do empreendimento, buscou-se avaliar como foram discutidas e tratadas as questões ambientais para os serviços de pavimentação. Analisando os documentos

EIA e RIMA do Trecho Norte do Rodoanel de 2010, nota-se que as preocupações com o consumo de energia e emissão de poluentes relacionados aos serviços de pavimentação são pequenas e de caráter qualitativo. No volume 2 do EIA do referido trecho, o item 4.2.9 cita, em linhas gerais, que as alternativas das soluções de pavimento devem ser estudadas a fim de minimizar os impactos, sem cita-los ou quantifica-los. No volume 6 do mesmo documento, existe uma ênfase maior no item 7.4.1.4 quanto aos impactos na qualidade do ar. Neste, são discutidas principalmente medidas durante a construção e posteriormente, na operação da via. Novamente, os serviços de pavimentação são tratados de forma qualitativa e não há indicação ou sugestão de uma maneira de avaliar quantitativamente soluções diferentes e seus impactos. O volume 7 cita a importância de avaliar outros tipos de impacto, tais como ruídos. No RIMA, os serviços de pavimentação são descritos em parte de um dos capítulos, porém de forma similar ao apresentado no EIA. Cabe salientar que tais estudos não têm por objetivo final a seleção do tipo de pavimento, mas sim da melhor alternativa de traçado, porém uma análise do pavimento, mesmo que preliminar, poderia complementar positivamente tais estudos.

Atualmente, além da prática não ser comum, os principais órgãos nacionais, estaduais e municipais, não indicam ou exigem tal avaliação no momento de se projetar alternativas de construção ou reabilitação de pavimentos. A evolução de um projeto que atenda às necessidades do ser humano é um projeto sustentável, que minimize a agressão ao meio ambiente.

Segundo Dumitrescu *et al*. (2014), o transporte rodoviário foi responsável por 32% do consumo de energia da Europa e 28% do CO_2 emitido no continente em 2013 considerando construção, reabilitação e operação das vias.

Acredita-se que a quantificação de emissões e consumos e avaliação dos resultados seja importante, dentro do segmento de projetos e obras de infraestrutura viária, para a busca constante de soluções sustentáveis, indo ao encontro dos objetivos da ONU e do Governo Brasileiro de redução na emissão de poluentes atmosféricos, assim como na redução do consumo de energia.

1.3 Estruturação

A estrutura principal deste trabalho é dividida em seis capítulos principais, conforme descrição a seguir.

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: Este capítulo tem como objetivo apresentar a importância da preservação ambiental e como esta pode ser relacionada aos projetos e obras de infraestrutura rodoviária. No capítulo são apresentados objetivos e justificativas para realização deste trabalho.

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: São expostos os principais poluentes atmosféricos e como os mesmos afetam não só o meio ambiente, mas também a saúde da população. Também são discutidos os processos de obtenção dos materiais de construção e a sua relação com a emissão de poluentes e consumo de energia e água. Por fim, são apresentados softwares capazes de levar em consideração a questão ambiental para projetos e obras de infraestrutura rodoviária.

Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS: O capítulo apresenta o principal software a ser utilizado no estudo, o PaLATE. São apresentadas suas principais características, assim como seu funcionamento e aplicação ao estudo. O capítulo traz ainda uma análise unitária realizada com software PaLATE objetivando a compreensão completa de seu funcionamento, análise esta que termina com a sugestão de gráfico de impressão digital ambiental para auxílio na escolha dos materiais.

Capítulo 4 – RESULTADOS: Apresentam-se neste capítulo, três diferentes estudos de caso. São descritos e analisados todos os resultados provenientes dos mesmos, que culminam na elaboração de equações de previsão das emissões de CO_2 em função do tipo estrutural do pavimento. Estas equações visam ser mais uma ferramenta de avaliação que, juntamente com o ábaco de impressão digital ambiental, auxiliem na análise e escolha de estruturas de pavimento do ponto de vista ambiental. Ao final de cada tópico são apresentadas conclusões parciais que são consolidas, posteriormente, no capítulo de conclusões e recomendações.

Capítulo 5 – CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA ESCOLHA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO: Neste capítulo apresenta-se a sugestão de inserção da parcela ambiental na metodologia de escolha de uma estrutura de pavimento utilizando as ferramentas sugeridas nos capítulos 3 e 4 deste trabalho. No capítulo consta ainda um exemplo de aplicação da metodologia proposta.

Capítulo 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas de todas as análises realizadas no estudo, contemplando desde a análise unitária realizada no Capítulo 3 até a análise estrutural-econômica-ambiental apresentada no capítulo 5. Recomendações para trabalhos futuros e para complementação da análise da ecoeficiência dos materiais são apresentadas ao final deste capítulo.

2 REVISÂO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE POLUENTES PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ao buscar determinar o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa de variados tipos de serviços nos pavimentos, necessita-se previamente determinar os componentes do processo a serem mensurados. Em geral, são apresentadas apenas partes de todo o processo tais como manufatura ou aplicação dos materiais. Tais análises podem induzir a conclusões errôneas, justamente por focar em apenas parte do problema. Uma maneira mais completa de mensurar os poluentes emitidos e a energia consumida é iniciar a análise desde a extração do material bruto da terra e adicionar todas as etapas operacionais tais como transporte, refinamento, manufatura, dosagem e aplicação. A tabela 2.1, adaptada de Chappat e Bilal (2003) ilustra e quantifica o consumo de energia e emissão de poluentes de variados produtos de construção considerando totais desde a extração até a venda.

Tabela 2.1 – Exemplo de Consumo de Energia e Emissão de CO_2 para materiais e serviços de pavimentação (Adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003)

Produto/Serviço	Energia (MJ/t)	CO_2 (kg/t)
Betume	4900	285
Emulsão	3490	221
Cimento	4976	980
Imprimadura Ligante	1244	245
Agregados	40	10
Aço	25100	3540
Cal	9240	2500
Água	10	0,3
Plástico	7890	1100
Combustível	35	4
Produção CBUQ	275	22
Produção *Warm Mix*	234	20
Produção Usina PMF	14	1
Fresagem	12	0,8
Reciclagem in-situ a quente	456	34
Reciclagem in-situ a frio	15	1,13
Estabilização com cimento in-situ	12	0,8
Aplicação de CBUQ	9	0,6
Placas de CCP	2,2	0,2
Transporte (km/t)	0,9	0,06

Diferentes tipos de soluções de reconstrução, reabilitação e preservação de pavimentos consomem diferentes quantidades de energia, assim como emitem diferentes tipos e quantidades de gases do efeito estufa. Parâmetros de consumo de energia e emissão de poluentes por tonelada de produto utilizado fornecem apenas uma comparação relativa de cada produto. Para uma avaliação completa, é necessário que sejam computados o tipo específico de pavimento e de técnicas a serem utilizadas, assim como as quantidades reais de material a ser utilizado. Dorchies (2008) após estudar diversos tipos de estrutura, comparando-as tanto estruturalmente quanto ambientalmente, concluiu que estruturas de mesma capacidade estrutural podem ter variações na emissão de poluentes de até 80%.

2.1.1 Materiais

Agregados, betume, ligantes asfálticos, cimento Portland, solos e fílers são apenas alguns dos materiais utilizados na constituição de revestimentos, bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. Os totais de consumo de energia e emissão de poluentes de uma rodovia, são obtidos, inicialmente computando-se os valores gerados pela extração do material bruto, passando pelo transporte e processamento (refinamento) do mesmo.

2.1.1.1 Agregados

Agregados pétreos são obtidos através de desmonte de rochas, trituração e gradação deste material. Instalações de britagem tem funcionamento similar no mundo todo, a Figura 2.1 traz um esquema do processo de uma típica instalação de britagem.

Apesar do funcionamento similar, os consumos de energia e emissão de poluentes gerados pelas estações de britagem, diferem-se não quanto ao funcionamento e organização da estação, mas quanto aos equipamentos utilizados e seus consumos e emissões individuais. O consumo de energia para a produção de agregados inclui a extração, transporte, trituração e gradação. Segundo Chappat e Bilal (2003), o consumo de energia para produção de agregados varia de 25.850 até 34.470 BTU/t ou entre 30 e 40 MJ/t. A emissão de gases de efeito estufa varia de 5 a 20 lb de $C0_2$/t, ou, entre 2,5 e 10 kg de CO_2/t.

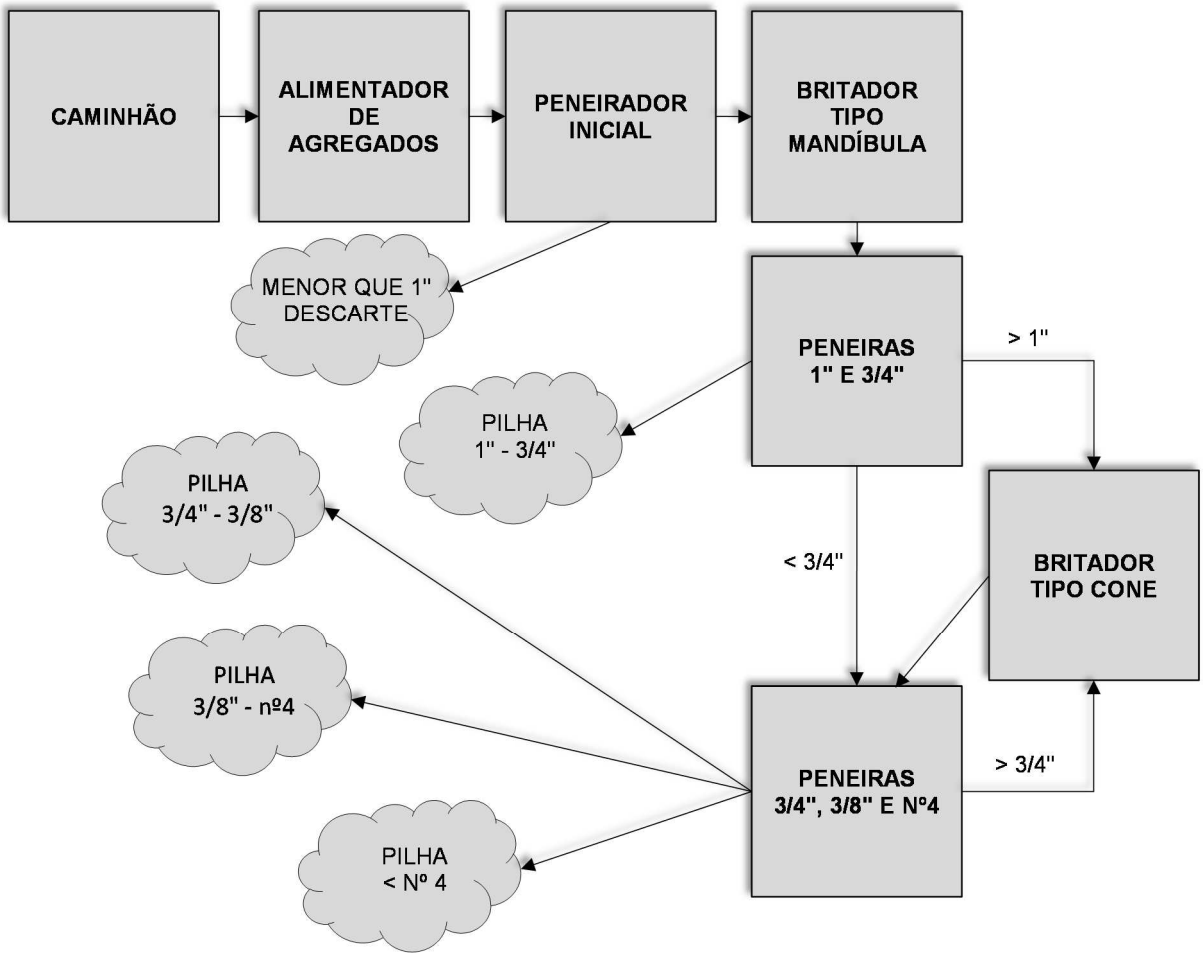


Figura 2.1 – Esquema de instalação de britagem típica (Adaptado de ROBERTS *et al.*, 1996)

2.1.1.2 Asfalto

O consumo de energia para produção de asfalto inclui a extração de petróleo, transporte e refino. Determinou-se o consumo de energia para a produção de asfalto como 4900 MJ/t e a emissão de gases do efeito estufa são 570 lb de CO_2/t (285 kg CO_2/t). Já para emulsões asfálticas o consumo de energia é de 3490 MJ/t e a emissão de gases de efeito estufa de 442 lb de CO_2/t (221 kg de CO_2/t) (Chappat e Bilal, 2003).

2.1.2 Extração do Agregado e Transporte

A extração do agregado é feita através do desmonte da rocha *"in natura"*. O desmonte é feito com uso de explosivos ou mecanicamente com a utilização de equipamentos de escavação.

Os impactos ambientais causados pela metodologia de desmonte de rocha com o uso de equipamentos de escavação se limitam apenas a emissão de poluentes gerados pela queima de combustíveis fósseis, e pela poluição sonora inerente a qualquer obra ou atividade do tipo.

No caso do desmonte de rocha com utilização de explosivos, os impactos são mais complexos e devem ser analisados em etapas, conforme proposto por Pontes *et al.* (2013).

As etapas a serem avaliadas são: Decapeamento (Limpeza e regularização); Perfuração das Bancadas; Carregamento dos furos com Explosivos; Amarração do Fogo; Desmonte com detonação; Carregamento e transporte. A Tabela 2.2 descreve os impactos por etapa.

Tabela 2.2 – Avaliação dos impactos ambientais no desmonte de rocha (Adaptado de PONTES *et al.*, 2013)

Fatores Ambientais	**Meio Físico**						**Meio Biótico**		**Meio Antrópico**	
	Água	**Ar**				**Solo**	**Fauna**	**Flora**	**Saúde**	
Aspectos / Atividades	Interferências em águas superficiais	Gases e poeiras	Vibrações	Ruído	Ultralançamento	Erosão da zona de lava	Migração de Aves/Mamíferos	Interferências na Vegetação	Acidente no Trabalho	Doença e Danos a Saúde
Decapeamento	N	N	N	N	I	N	N	N	N	I
Perfuração das Bancadas	N	N	N	N	I	-	N	I	N	N
Carregamento dos Furos com explosivo	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N
Amarração do fogo	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N
Demonte com detonação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Carregamento e Tranporte	N	N	N	N	N	I	N	N	N	N

N = IMPACTO NEGATIVO I = INEXISTÊNCIA DE IMPACTO

Nota-se que os impactos de carregamento e transporte também ocorrem no caso de desmonte de rocha mecanizado. Os mesmos também derivam da queima de combustíveis fósseis.

2.1.3 Britagem e Gradação

Segundo Roberts *et al*. (1996), no desmonte, partículas menores e mais frágeis são removidas previamente aos trabalhos de britagem. Logo após esta primeira separação, a rocha desmontada segue para um britador primário tipo mandíbula que reduzirá a rocha em pedaços menores para que estes estejam em tamanhos adequados para os demais britadores. Logo após está etapa, vem a primeira etapa de gradação e peneiramento com intuito de separar materiais maiores que 1" (25,4mm), materiais entre 1" e ¾" (19mm) e materiais menores que ¾". O primeiro é colocado em um britador do tipo cone para britagem adicional, o segundo é estocado e o terceiro é levado para um segundo processo de gradação. Neste processo separa-se e o material em três pilhas distintas para estoque: Entre ¾" e 3/8" (9,5 mm), entre 3/8" e nº4 (4,8 mm) e materiais menores que 4,8 mm. (BERNUCCI *et al*., 2008).

O processo básico de uma estação de britagem se resume ao acima descrito, sendo que as plantas de britagem podem variar quanto ao tipo de equipamento e quanto a complexidade dos processos.

Quanto aos impactos, segundo Bacci *et al*. (2006), as atividades de britagem e gradação da rocha causam poluição sonora e do ar, sendo está última dividida entre materiais particulados e emissões de GEE através da queima de combustíveis fósseis na operação e funcionamento dos britadores, das peneiras e demais equipamentos utilizados no processo.

2.1.4 Produção e Estocagem

O processo para obtenção de asfalto consiste no processamento e refino do petróleo cru dentro das refinarias. Segundo Roberts *et al*. (1996) o asfalto cru pode ter uma grande variação em sua composição dependendo de onde o mesmo é extraído sendo que a principal característica é a sua densidade. Variações na densidade do petróleo encontrado podem variar a quantidade e os tipos de materiais a serem obtidos com o seu refinamento como ilustra a Figura 2.2

Tipos de Petróleo	Boscan Venezuela	Arabian Heavy	Nigeria Light
Grau API	10,100	28,200	38,100
Densidade	0,999	0,866	0,834
% de Enxofre	6,400	2,800	0,200

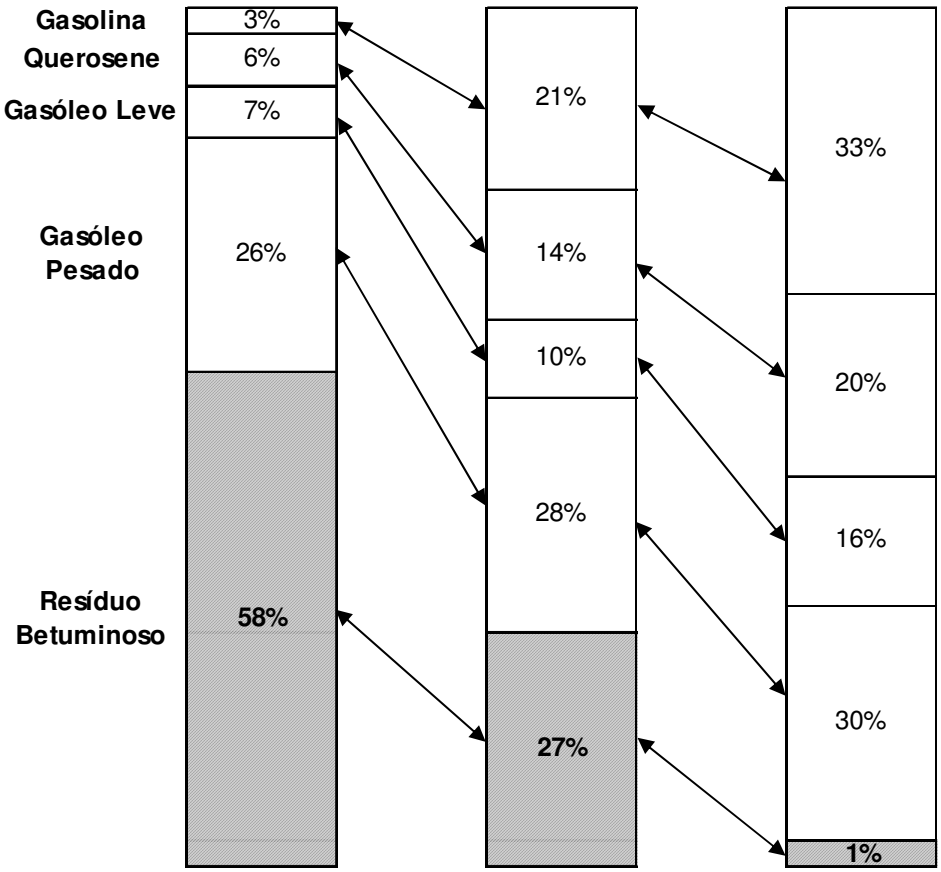


Figura 2.2 – Esquema de petróleo com diferentes tipos de densidade e seus subprodutos (Adaptado de ROBERTS et. al, 1996)

Segundo Bernucci *et al*. (2008), o processo de refino do petróleo para produção de ligantes asfálticos difere de petróleo para petróleo. A técnica mais antiga é a de destilação direta que pode ser executada em um ou dois estágios, dependendo do tipo de petróleo. Quando o petróleo é de alta densidade, ou seja, tem mais asfalto em sua composição, faz-se necessário apenas um estágio de destilação a vácuo (Figura 2.3) para a produção de um CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) adequado.

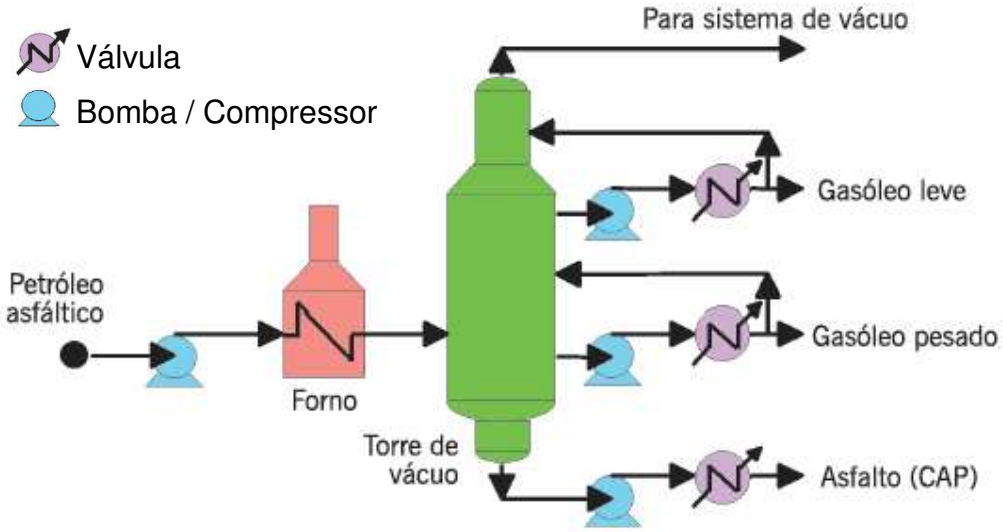


Figura 2.3 – Processo de obtenção de CAP com destilação única a vácuo (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Em petróleos de baixa densidade, são necessárias destilações atmosférica e a vácuo (Figura 2.4), sendo que talvez não fique adequado para o uso em pavimentação além do processo ser mais poluidor comparado ao anterior devido o acréscimo de etapas.

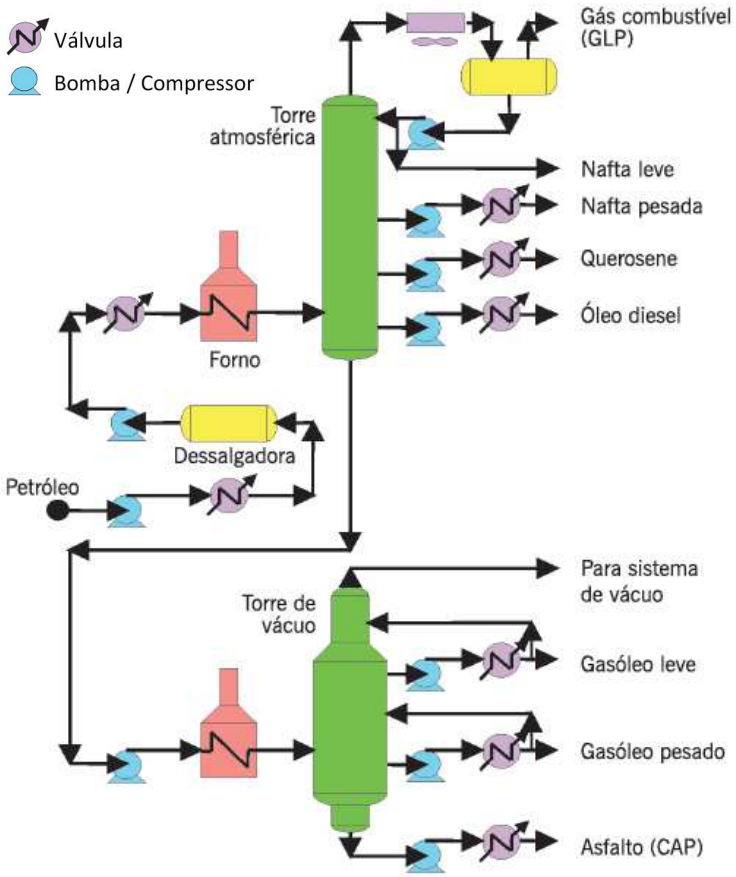


Figura 2.4 – Processo de obtenção de CAP com destilação atmosférica e destilação a vácuo (BERNUCCI *et al.*, 2008)

2.1.5 Manufatura

O processo de manufatura inclui todas as etapas que envolvem manuseio, estoque, secagem, mistura e preparação dos materiais para a instalação. O consumo de energia varia dependendo da especificidade de cada material. Os produtos manufaturados mais comuns na construção de estradas e rodovias incluem o HMA (hot mix asphalt), mistura a frio, selantes de trincas entre outros. A produção de HMA consome 237.000 BTU/t (275 MJ/t) e libera para a atmosfera 44 lb de CO_2/t (22 kg de CO_2/t). A produção de asfalto morno segundo os estudos de Chappat e Bilal (2003) consome 201.000 BTU/t (234 MJ/t), cerca de 15% a menos do que o HMA. Nota-se que existem os mais variados tipos de misturas asfáltica cujo consumo energético oscila em função da temperatura requerida em sua produção. Pré misturados a frio, por exemplo, necessitam de apenas 12.000 BTU/t (14MJ/t) pois não necessitam aquecer o agregado até a temperatura de mistura.

2.1.6 Transporte

Necessita-se transportar o material de construção para o canteiro de obras ou instalação de produção, usina. O consumo de energia do transporte do material varia em função da distância e da quantidade de material a ser transportado. No estudo de Chappat e Bilal (2003), foi reportado um consumo de 1.250 BTU/t-milha, que representa 0,9 MJ/km-t com emissão de 0,2 lb de CO_2/t-milha (0,06 kg de CO_2/km-t).

2.1.7 Consumo de Energia e Emissões Totais

Nas tabelas Tabela 2.3 e Tabela 2.4 estão exemplificados totais de consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa por material bruto, manufatura, transporte e aplicação. Os dados demonstram que pavimentos que utilizam cimento portland tendem a ter um consumo de energia maior do que pavimentos que não utilizam este material.

Tabela 2.3 – Exemplo de Consumo de Energia por tipo de material (adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003)

Produto	Aglomerante /Ligante	Agregado	Manufatura	Transporte	Aplicação	Total (MJ/t)
Concreto Betuminoso	279	38	275	79	9	680
Base de Concreto Asfáltico	196	36	275	75	9	591
Concreto Asfáltico de Módulo Elevado	284	38	289	79	9	699
Mistura Asfáltica Morna	294	38	234	80	9	655
Agregado com Emulsão	227	37	14	81	6	365
Concreto Asfáltico Pré-Misturado a Frio	314	36	14	86	6	456
Materiais Cimentados	200	32	14	67	6	319
Agregado com Aglomerante Hidraulico	50	29	14	61	6	160
Placa de CCP s/ barras de transferência	598	40	14	84	2.2	738
Placa de CCP continuamente armada	1100	29	14	81	2.2	1226
Material Granular	0	40	-	68	6	114
Solo Tratatado com Cal e Cimento	63	0	-	7	12	82
Termo Reciclagem	98	4	-	12	456	570
Concreto asfáltico com 10% de RAP	250	35	275	73	9	642
Concreto asfáltico com 20% de RAP	157	33	275	64	9	538
Concreto asfáltico com 30% de RAP	137	39	275	58	9	518
Concreto asfáltico com 50% de RAP	98	25	275	47	9	454
Reciclagem In-situ com Emulsão	105	4	-	15	15	139

Tabela 2.4 – Exemplo de Emissão GEE por tipo de material (adaptado de CHAPPAT; BILAL, 2003)

Produto	Aglomerante /Ligante	Agregado	Manufatura	Transporte	Aplicação	Total (kg/t)
Concreto Betuminoso	16.0	9.4	22.0	5.3	0.6	53
Base de Concreto Asfáltico	11.0	7.6	22.0	5.3	0.6	47
Concreto Asfáltico de Módulo Elevado	17.0	9.4	23.1	5.0	0.6	55
Mistura Asfáltica Morna	17.0	9.4	20.5	5.3	0.6	53
Agregado com Emulsão	14.0	9.4	1.0	5.4	0.4	30
Concreto Asfáltico Pré-Misturado a Frio	20.0	9.1	1.0	5.7	0.4	36
Materiais Cimentados	39.0	5.7	1.0	4.5	0.4	51
Agregado com Aglomerante Hidraulico	10.0	5.1	1.0	4.1	0.4	21
Placa de CCP s/ barras de transferência	118.0	9.6	1.0	5.6	0.2	134
Placa de CCP continuamente armada	188.0	5.1	1.0	5.4	0.2	200
Material Granular	0.0	9.6	-	4.5	0.4	15
Solo Tratatado com Cal e Cimento	12.0	-	-	0.5	1.1	14
Termo Reciclagem	6.0	1.0	-	0.8	34.2	42
Concreto asfáltico com 10% de RAP	15.0	8.6	22.0	4.9	0.6	51
Concreto asfáltico com 20% de RAP	9.0	7.8	22.0	4.3	0.6	44
Concreto asfáltico com 30% de RAP	8.0	7.0	22.0	3.9	0.6	42
Concreto asfáltico com 50% de RAP	6.0	5.1	22.0	3.1	0.6	37
Reciclagem In-situ com Emulsão	7.0	1.0	1.1	1.0	0.4	11

2.1.8 Conclusões Parciais

Evidenciou-se com os itens anteriormente apresentados que as emissões e consumos variam de acordo com o equipamento utilizado. A quantificação e avaliação exata dos poluentes emitidos se torna uma tarefa difícil, dada a variedade de equipamentos e veículos utilizados para obtenção e transporte dos materiais e também devido ao estado de conservação dos mesmos.

Conforme indicado no Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de São Paulo, elaborado pela CETESB (2014), as emissões totais para veículos são calculadas através da emissão original, considerando o veículo novo, acrescida de um percentual devido a sua deterioração. Este fator pode ser aplicado não só aos veículos, mas também a qualquer outro equipamento com funcionamento à combustão. Equipamentos de funcionamento elétrico possuem o mesmo problema em relação ao consumo de energia, onde equipamentos mais antigos tendem a consumir mais energia devido a deterioração de seus componentes.

2.2 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E AMBIENTAIS

Apesar do Dióxido de Carbono (CO_2) ser o poluente mais preocupante e de maior aparição em pesquisas de impacto ambiental, outros poluentes fazem parte dos denominados “gases do efeito estufa”. Óxidos de Nitrogênio, Dióxido de Enxofre, Monóxido de Carbono e Mercúrio, geralmente resultantes de combustões incompletas de combustíveis fosseis, são tão poluentes e nocivos ao meio ambiente quanto o CO_2.

Os gases e partículas poluentes tem sua emissão concentrada na troposfera, que é a camada da atmosfera mais próxima à superfície terrestre. Os mesmos são facilmente carregados através do mecanismo de convecção se acomodando na estratosfera.

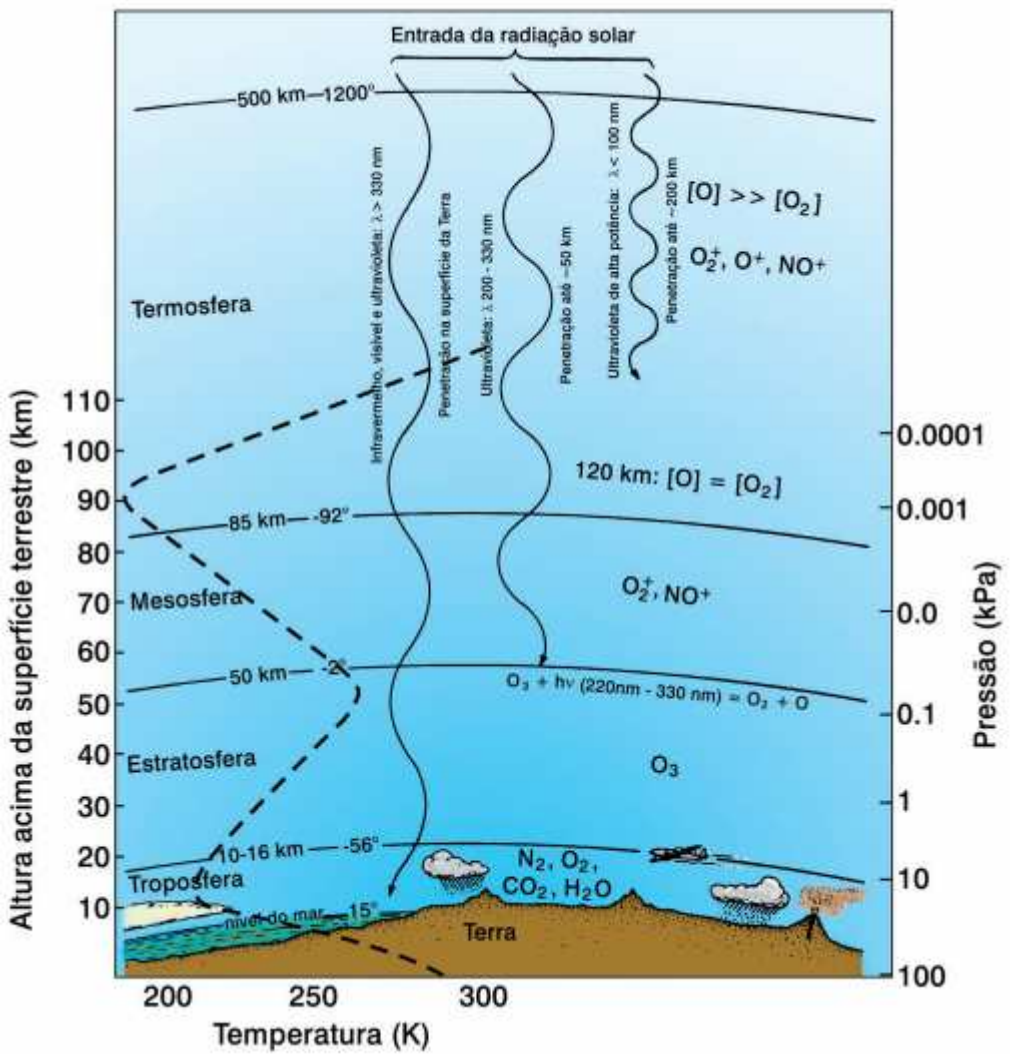


Figura 2.5 – Esquema das camadas da atmosfera e principais parâmetros (MOZETO, 2001)

A seguir são apresentados os principais poluentes e suas respectivas características e descrição.

2.2.1 Principais Poluentes

2.2.1.1 Dióxido de Carbono (CO_2)

O composto químico formado por moléculas de carbono e oxigênio, é essencial no processo de fotossíntese e resultado da respiração de seres humanos, animais e organismos vivos. O composto é amplamente utilizado em bebidas gaseificadas, em extintores de incêndio, produção de cimento, porém sua maior fonte geradora é a queima de combustíveis fósseis. O CO_2 em concentrações elevadas na atmosfera tende a aumentar a capacidade de retenção de calor do planeta Terra aumentando o efeito estufa. O aumento expressivo da concentração de CO_2 na atmosfera teve início entre final do século XVIII e início do século XIX com a revolução industrial, desde então os níveis do dióxido de carbono só aumentam ano após ano

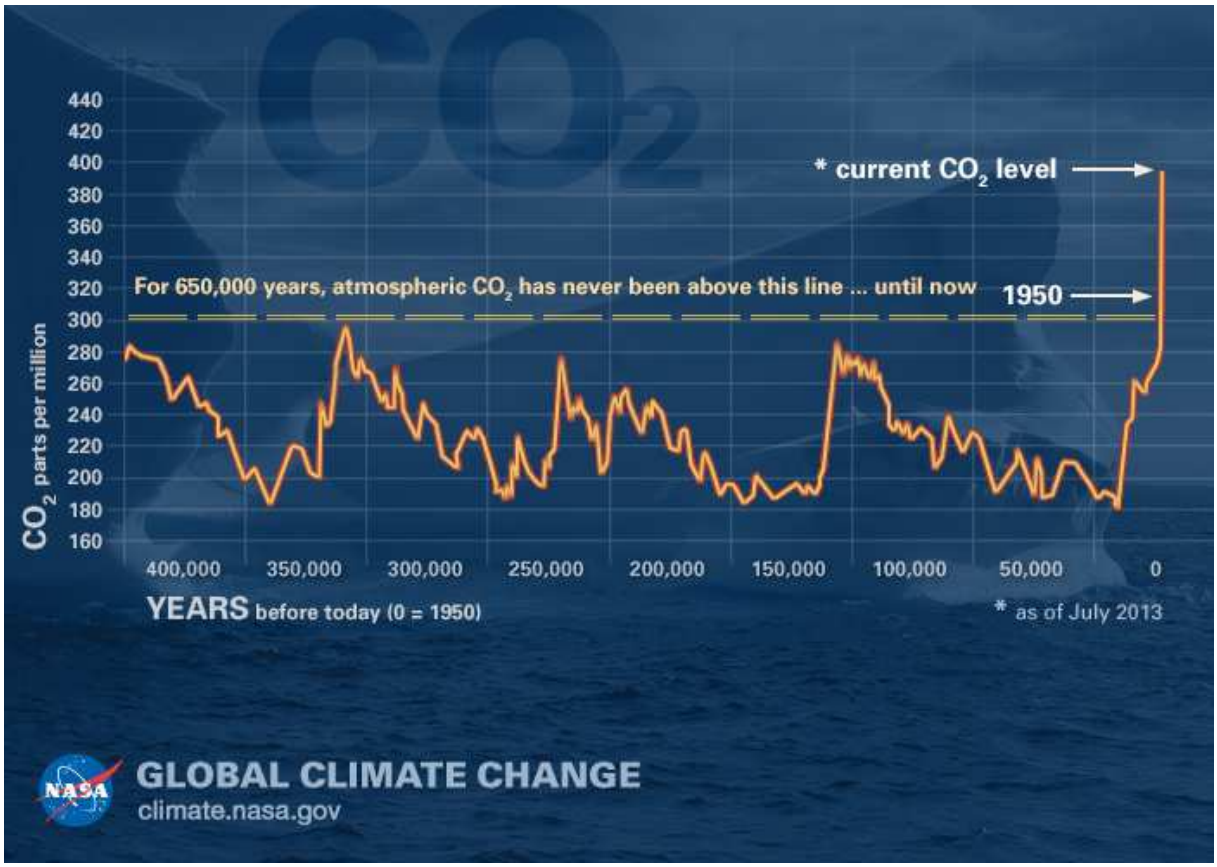


Figura 2.6 – Série histórica de emissão de CO_2 (NASA, 2013)

2.2.1.2 Óxidos de Nitrogênio (NO_X)

O grupo de óxidos de nitrogênio é formado por sete compostos diferentes, sendo que apenas dois deles podem ser considerados como poluentes atmosféricos. O dióxido

de nitrogênio (NO_2) e o óxido nítrico (NO) são importantes compostos na química da atmosfera e, assim como o CO_2 tem sua principal fonte geradora a queima de combustíveis fósseis a elevadas temperatura. Podem também ser emitidos através de transformações microbianas e descargas elétricas na atmosfera.

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (2003), óxidos de nitrogênio contribuem para a formação de Ozônio na Troposfera. O composto, que tem principal concentração na Estratosfera, em concentração elevada na camada inadequada, além de contribuir no aumento das temperaturas do planeta, pode causar sérios problemas respiratórios ao ser humano.

2.2.1.3 Materiais Particulados (PM_{10})

Materiais particulados são resíduos da queima de combustíveis fósseis e tem características tóxicas. Pela definição da USEPA (2017d), o material particulado se trata de uma mistura de partículas extremamente finas ou gotículas de substâncias líquidas dos mais variados tipos de materiais, tais como ácidos, sulfatos, nitratos e metais. Especificamente o PM_{10} é o material particulado cujas partículas tem tamanho entre 2,5 e 10 micrômetros.

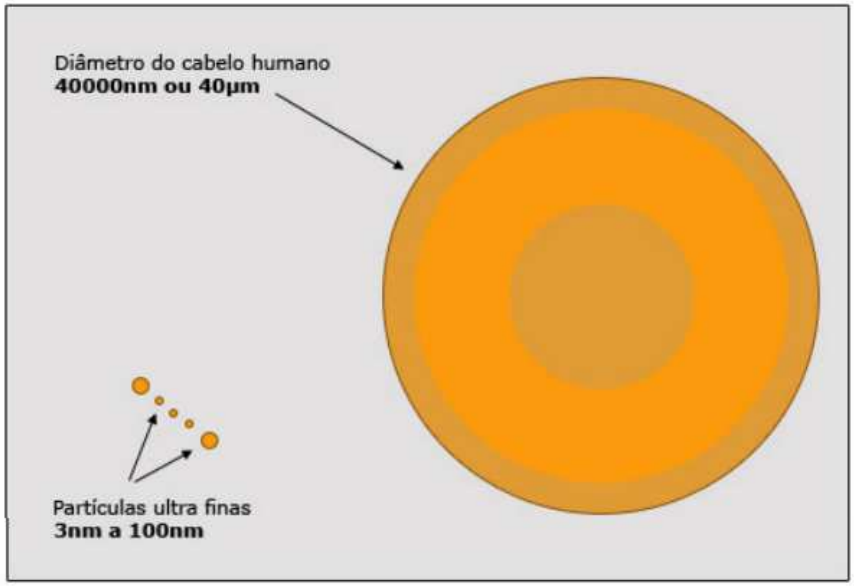


Figura 2.7 – Ordem de grandeza de materiais particulados PM_{10} (ANDRADE, 2011)

No meio ambiente, são causadores de redução de visibilidade em locais de altas concentrações. Devido ao seu tamanho microscópico, este poluente é mais prejudicial ao ser humano. As pequenas partículas e/ou gotículas podem ser facilmente inaladas

penetrando nas defesas dos organismos, atingindo os alvéolos pulmonares podendo causar desde irritações e asma até bronquites agudas e câncer pulmonar.

2.2.1.4 Dióxido de Enxofre (SO_2)

De acordo com a USEPA (2017e), o Dióxido de Enxofre é apenas um de diversos Óxidos Sulfúricos (SO_x) que poluem a atmosfera. O SO_2 é tratado de forma especial, pois sua concentração na atmosfera é muito maior do que os demais óxidos sulfúricos, logo, esta substância tende a ser mais poluente. É originado, em sua maioria, pela queima de combustíveis fósseis e também pode ser emitido naturalmente por vulcões. Seus principais danos são à saúde do ser humano pois além dos habituais problemas respiratórios, podem causar irritação nos olhos e complicações cardiovasculares. No meio ambiente, podem causar danos às folhas das plantas, causando enfraquecimento e morte das mesmas, além de contribuir para formação de chuvas ácidas

2.2.1.5 Monóxido de Carbono (CO)

Gás incolor e inodoro que pode causar danos quando inalado em grandes quantidades. O monóxido de carbono é liberado quando algo é queimado, não necessariamente apenas combustível. A grande fonte de CO é definitivamente a queima de combustíveis fósseis por veículos. O monóxido de carbono, além de fazer parte dos gases que contribuem para o efeito estufa, é principalmente prejudicial à saúde do ser humano, quando inalado, reduz a taxa de oxigênio no sangue que pode afetar órgãos vitais como cérebro e coração. Segundo a USEPA (2017a) São dificilmente encontrados em grandes concentrações em áreas externas, porém quando encontrado desta forma, pode causar tontura, confusão, desmaios e até mesmo a morte.

2.2.1.6 Mercúrio (Hg)

O mercúrio trata-se de um elemento químico encontrado basicamente em rochas. Segundo a USEPA (2017c), o mercúrio passa a ser um problema para o meio ambiente quando este elemento é dissociado da rocha e acaba na atmosfera e na água. Esta dissociação ocorre principalmente devido às atividades humanas como

queima de combustíveis e carvão. O mercúrio é especialmente prejudicial à saúde do ser humano. Considerado como uma neurotoxina, a saúde humana pode ser afetada por mercúrio dependendo de fatores como a quantidade, a idade e as condições de saúde da pessoa, o tempo e até a maneira de exposição (respirando, contato, ingerindo e etc.). No meio ambiente, afeta outros animais podendo alterar por completo o funcionamento de ecossistemas inteiros.

2.2.1.7 Chumbo (Pb)

Segundo a USEPA (2017c), as fontes de emissões de chumbo variam de uma área para outra. As principais fontes de chumbo no ar são o processamento de minérios e metais e aeronaves de pistão-motor que operam com combustível de aviação com chumbo. Outras fontes são incineradores de resíduos, utilitários e fabricantes de baterias de chumbo-ácido. As maiores concentrações de chumbo no ar são normalmente encontradas perto de usinas de fundição de chumbo. Houve grande mobilização nos EUA para remoção do chumbo da gasolina, fator que acabou por reduzir as emissões em 98% entre 1980 e 2014. Assim como o mercúrio, o chumbo é muito prejudicial à saúde humana. Uma vez no organismo, o chumbo se espalha no sangue pelo corpo e se acumula nos ossos. Dependendo do nível de exposição, o chumbo pode afetar o sistema nervoso, o funcionamento dos rins e os sistemas imunológico e cardiovascular. No meio ambiente, causa o enfraquecimento de plantas, funcionando como agente tóxico.

2.2.2 Danos Atmosféricos, Ambientais e à Saúde

Com intuito de resumir a pesquisa bibliográfica facilitando a compreensão sobre a importância e peso que cada poluente exerce nas questões ambientais, é apresentada a Tabela 2.5 que resume os principais danos atmosféricos, ambientais e à saúde de cada poluente descrito neste tópico.

Tabela 2.5 – Poluentes e principais danos ao meio ambiente e à saúde

Poluente	Danos ao Meio Ambiente	Danos à Saúde
CO_2	Em grandes concentrações, aumenta a capacidade de retenção do calor do planeta.	Danos respiratórios leves apenas em grandes concentrações.
NO_X	Em grandes concentrações, aumenta a capacidade de retenção do calor do planeta. Facilita a geração de ozônio na Troposfera.	Problemas respiratórios graves.
PM_{10}	Redução de Visibilidade.	Irritações, asma, bronquite e câncer pulmonar.
SO_X	Enfraquecimento da flora, através de danos ás folhas. Contribui na formação de chuvas ácidas.	Irritação nos olhos, problemas respiratórios e cardiovasculares.
CO	Em grandes concentrações, aumenta a capacidade de retenção do calor do planeta.	Reduz a taxa de oxigênioo no sangue quando inalado, causando tontura, desmaios e morte.
Hg	Afeta indiretamente o funcionamento de ecossistemas.	Neurotoxina, afeta o sistema nervoso central.
Pb	Agente tóxico que causa enfraquecimento das plantas.	Tende a se acumular nos ossos. Em grandes níveis de exposição, afeta os sistemas nervoso, imune e cardiovascular além de causar mau funcionamento dos rins.

2.2.3 Conclusões Parciais

Buscou-se, durante a execução deste tópico, identificar qual poluente era o mais prejudicial e qual causava o dano mais significativo seja ao meio ambiente, seja ao ser humano, objetivando um afunilamento no estudo, focando nos principais poluentes. Porém, pode-se observar que cada poluente tem uma parcela significativa de contribuição nos danos ambientais e à saúde do ser humano, tornando muito difícil a avaliação de qual poluente causa o dano mais significativo. Sendo assim, optou-se por seguir o estudo contemplando todos os poluentes e itens de consumo até então estudados.

2.3 SOFTWARES PARA ANÁLISE AMBIENTAL

Com o avanço dos estudos a respeito da qualidade do ar, cada vez mais necessita-se não só de metodologias e equipamentos para medição, identificação e controle de emissões, mas também de ferramentas para prever as emissões e consequentemente os impactos que estas podem causar.

Neste ponto, destacam-se duas formas principais de avaliação ambiental com programas computacionais: a quantitativa, que busca valores precisos para volumes de emissão; e a qualitativa, que avalia projetos de acordo com escalas de desempenho.

2.3.1 Softwares Qualitativos

Apesar de serem estarem enquadrados como programas computacionais, a maioria destes softwares que avaliam a questão ambiental qualitativamente se tratam de rotinas. Atribuem-se notas para cada fase, seja de obra ou projeto e em função destas notas ou da composição das mesmas, uma qualificação ou selo é atribuído ao empreendimento.

Dentre os softwares capazes de realizar este tipo de análise, destacam-se o LEED Neighborhood, versão do selo LEED específica para o viário urbano; Greenroads e GreePave que definem atributos de sustentabilidade da rodovia, proveem um sistema de avaliação de sustentabilidade da via e contemplam uma coletânea de soluções e práticas sustentáveis tanto de projeto quanto de construção.

Apesar da falta de precisão, estas avaliações qualitativas têm surtido efeito positivo na sociedade que cada vez mais exige empreendimentos com selos de sustentabilidade.

2.3.2 Softwares Quantitativos

A bibliografia aponta que a previsão das emissões e qualidade do ar pode ser dividida basicamente entre duas metodologias principais: estatística ou por métodos numéricos (USEPA, 2003)

Segundo Rocha (2014), a metodologia estatística, como o próprio nome sugere, busca relacionar estatisticamente variáveis meteorológicas e de qualidade do ar levando ao

cálculo das emissões. Já a metodologia numérica, consiste na análise de fenômenos químicos e físicos, buscando modelos que descrevam tais fenômenos. Tais modelos cada vez mais são compilados em programas computacionais, para previsão da emissão de poluentes.

A bibliografia mostra um número limitado de softwares que são capazes de computar a emissão de poluentes e menor ainda é a gama de programas capaz de lidar especificamente com serviços relacionados a infraestrutura rodoviária.

Santos *et al*. (2017) resume as cinco ferramentas que são voltadas para avaliação do ciclo de vida de pavimentos rodoviários, que são capazes de computar as emissões de poluentes nas etapas de construção e manutenção das estruturas de pavimento.

Os softwares citados por Santos *et al*. (2017) são: GaBi, software alemão cuja base de dados é proveniente da indústria alemã e bancos de dados americanos; DuboCalc, proveniente da Holanda cuja base dados é local; VTTI/UC, desenvolvido nos EUA e com base de dados proveniente exclusivamente da literatura; ECORCE-M, programa francês com base dados proveniente da literatura e da indústria; e PaLATE, programa também desenvolvido nos EUA que utiliza modelo EIO-LCA (*Economic Input-Output Life Cycle Assessment*) da Carnegie Mellon University.

Além destes, softwares de gerenciamento de pavimentos tais como o HDM-4, também possuem modelos de emissão de poluentes em seus códigos fonte, porém apenas para a fase de utilização da via, ou seja, modelos exclusivos para as emissões do tráfego atuante na via em estudo.

Dentre os softwares apresentados, apenas o PaLATE possui acesso liberado de restrições, sem custo de utilização e é inteiramente voltado para análise ambiental, ou seja, seus “outputs”, ou suas saídas, se resumem às emissões de poluentes e consumos de água e energia. Os outros softwares citados são, em sua maioria, focados na análise do ciclo de vida do pavimento e tem análise ambiental como complemento.

Por estes motivos, o PaLATE foi o programa computacional escolhido para desenvolvimento deste trabalho.

2.3.3 Projetos de Referência

A utilização dos softwares e sistemas descritos em projetos e obras de infraestrutura rodoviária é recente, e está restrita a casos fora do Brasil. O Greenroads (2018) possui um acervo de projetos e obras onde sua metodologia foi implementada. Esta metodologia, denominada como *Rating System* (Greenroads, 2015), os projetos são avaliados em sete diferentes categorias sendo atribuídas pontos para cada subcategoria avaliada. A pontuação final pode variar de 0 a 130 pontos e são atribuídos 4 diferentes selos de acordo com a pontuação sendo Bronze para pontuações maiores ou iguais a 40, Prata para o limite de 50 pontos, Ouro para 60 pontos e *Evergreen* (Sempre verde) para 80 pontos ou mais. A seguir são apresentados os resumos de alguns dos projetos avaliados.

2.3.3.1 Reconstrução da Rua Asotin - Tacoma, WA (EUA)

A Rua Asotin fica localizada na cidade de Tacoma, no estado de Washington nos EUA e segundo o *Greenroads* (2018), este projeto transformou completamente esta via, que possuía pavimento com alto grau de deterioração e passou a ter, além de passeio e paisagismo remodelado, estrutura de pavimento com asfalto poroso, favorecendo a drenagem superficial no local. Este projeto foi motivado pela proximidade do lago Wapato, onde foram verificados altos níveis de fósforo e projetos como este, ajudam a reduzir o carregamento de contaminantes para o lago contribuindo para a preservação do mesmo.

A Figura 2.8 apresenta a imagem da Rua Asotin ao fundo após as obras com o quadro em destaque da avaliação qualitativa do projeto e obra. Este empreendimento recebeu a certificação Bronze pelo *Greenroads*.

Figura 2.8 – Reconstrução da Rua Asotin (GREENROADS, 2018)

A seguir é apresentado um resumo em tópicos deste empreendimento:

- Cliente: Cidade de Tacoma, WA – EUA
- Custo de construção: $0,45 milhões de dólares americanos;
- Projeto: Cidade de Tacoma;
- Construtor: Miles Resources;
- Extensão da Via: 177 m;
- Versão do greenroads utilizada: v1.5.

2.3.3.2 Reconstrução da Rua Cheyenne - Tacoma, WA (EUA)

Este projeto foi centrado em torno da reconstrução da Cheyenne Street, uma entrada para as principais áreas de estacionamento do Estádio Cheney, bem como adaptações para o próprio estacionamento. A cidade de Tacoma aproveitou a oportunidade para melhorar o acesso multimodal, reduzir o carregamento de poluentes das águas pluviais e aumentar a quantidade de árvores no local.

Um dos principais objetivos do projeto era melhorar o escoamento de águas pluviais das áreas de ruas e estacionamentos, através da implementação de jardins e de pavimentos permeáveis. Além disso, o projeto buscou melhorar as instalações para ciclistas e pedestres, fornecer soluções energeticamente eficientes e aumentar as áreas com vegetação. A Figura 2.9 mostra a Rua Cheyenne e a avaliação do Greenroads que certificou este empreendimento como Prata.

Figura 2.9 – Reconstrução da Rua Cheyenne (GREENROADS, 2018)

A seguir é apresentado um resumo em tópicos deste empreendimento:

- Cliente: Cidade de Tacoma, WA – EUA
- Custo de construção: $3,10 milhões de dólares americanos;
- Projeto: KPG;
- Construtor: Tucci & Sons, Stan Palmer Construction;
- Extensão da Via: 660 m;
- Versão do greenroads utilizada: v1.5.

2.3.3.3 Estrada 77 - Israel

O projeto da Estrada 77 - Tel Kashish para Ramat Ishay envolve uma combinação de ampliação e nova construção de 5,5 quilômetros da estrada 77 na região da Alta Galiléia, em Israel. Além da rodovia de quatro pistas, será construída uma rodovia regional, bem como estradas agrícolas e ciclovias conectadas à estação de trem Yokneam, nas proximidades.

As características sustentáveis da rodovia incluem práticas responsáveis de construção, paisagismo extenso e manejo de águas pluviais. Os destaques do projeto incluem: Paisagismo ao longo da via; iluminação em LED; Instalação de barreiras acústicas e certificações ambientais ISO e OSHAS.

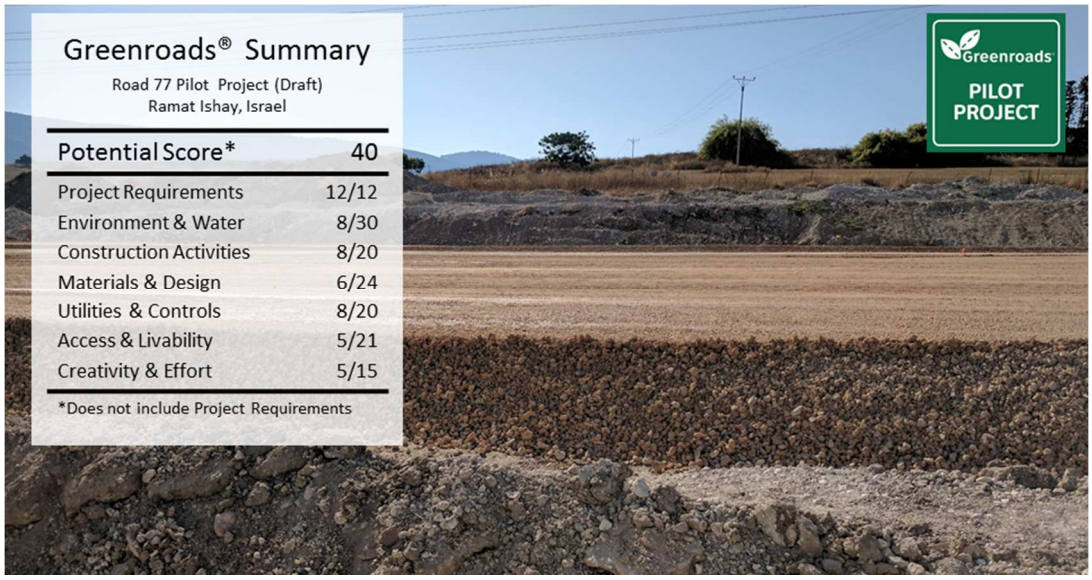


Figura 2.10 – Ampliação da Estrada 77 - Israel (GREENROADS, 2018)

A seguir é apresentado um resumo em tópicos deste empreendimento:

- Cliente: Netivei Israel
- Custo de construção: $77 milhões de dólares americanos;
- Projeto e Construção: Solel Boneh;
- Extensão da Via: 5,5 km;

Os exemplos de implementação apresentados são apenas três, de dezenas disponíveis no site do Greenroads e a apresentação destes tem o objetivo de destacar dois pontos principais para esta pesquisa:

1) A avaliação ambiental de projetos de infraestrutura viária já possui certificações como as do LEED e do Greenroads e tende a seguir o caminho dos empreendimentos imobiliários e;
2) Apesar do Greenroads recomendar a utilização do PaLATE para avaliações quantitativas mais precisas, nenhum dos estudos de caso presentes no site mostra um estudo deste tipo, fator este que serve como motivação para um estudo quantitativo de emissão de poluentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo, tem como objetivo principal apresentar e descrever o software que será utilizado neste trabalho para computar e analisar as emissões de poluentes e consumo de água e energia. O capítulo é composto de apresentação do software e de análise unitária, a fim de compreender o funcionamento do mesmo e como se comportam as emissões e consumos de cada material normalmente empregado em camadas de pavimentação.

3.1 SOFTWARE PaLATE

3.1.1 Histórico

O programa PaLATE, sigla para *Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*, foi desenvolvido no ano de 2003 pelo Professor Arpad Horvath e sua equipe na Universidade da Califórnia, em Berkley (Horvath, 2004a).

Horvarth, juntamente com Sergio Pacca, Eric Masanet e Rachel Canapa faziam parte do *Consortium on Green Design and Manufacturing*, grupo formado em 1993 na Universidade da Califórnia com o objetivo de fomentar pesquisas multidisciplinares na redução de poluentes nocivos ao ser humano e à atmosfera terrestre.

Os quatro pesquisadores desenvolveram o PaLATE através de extensa pesquisa bibliográfica, de modelos de consumo de energia e água e de emissão de poluentes gerados desde a produção dos materiais para a pavimentação até a etapa de construção. Além dos citados, modelos econômicos fazem parte do programa e são utilizados para análise econômica do ciclo de vida dos pavimentos.

Atualmente, o PaLATE se encontra disponível na versão 2.0 no site do *Recycled Materials Resorce Center* (2016), grupo de pesquisas fundado em 1998 na Universidade de New Hampshire, com o objetivo de auxiliar os Departamentos de Transportes dos diversos estados Americanos, na utilização de materiais reciclados em seus novos empreendimentos.

3.1.2 Principais Aplicações e Limitações

O PaLATE é uma ferramenta baseada em planilha de Excel para avaliação dos ciclos de vida ambiental e econômico especificamente para serviços de pavimentação de estradas e rodovias.

A ferramenta é capaz de apresentar, além de custos iniciais e totais ao longo do ciclo de vida do pavimento, dados de caráter ambiental tais como: Consumo de energia e água; Emissão de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), materiais particulados (PM_{10}), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb).

Pode ser utilizada para comparação e avaliação de diferentes tipos de soluções de pavimentação, auxiliando na tomada de decisões levando em conta as características econômico-ambientais de cada solução.

Como limitações, não é possível simular com o programa alguns tipos de materiais, como macadame betuminoso, por exemplo e nem algumas novas técnicas construtivas como as misturas asfálticas mornas (WMA), solução considerada como ecologicamente favorável em função de sua redução de temperatura durante a execução da mistura asfáltica.

3.1.3 Estrutura e Funcionamento

O PaLATE foi concebido e estruturado de forma lógica buscando abranger todas as fases do ciclo de vida de um pavimento conforme demonstrado na Figura 3.1

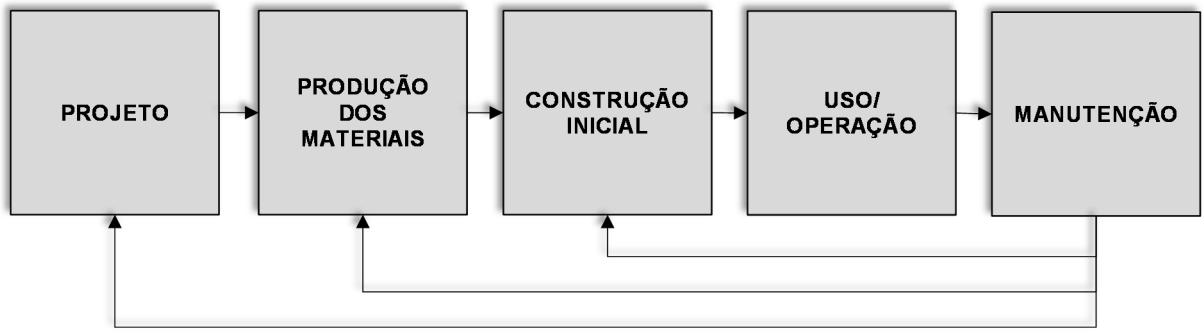


Figura 3.1 – Ciclo de Vida do Pavimento (HORVATH, 2004a)

Para cada etapa em específico, baseados em bibliografia técnica, foram elaborados modelos referentes ao consumo de energia e emissão de poluentes. Estes modelos foram compilados em um programa capaz de avaliar a ecoeficiência de cada uma das

soluções de pavimento a serem comparadas (HORVATH, 2004a). A Figura 3.2 resume as principais referências utilizadas em cada uma das etapas de avaliação do ciclo de vida.

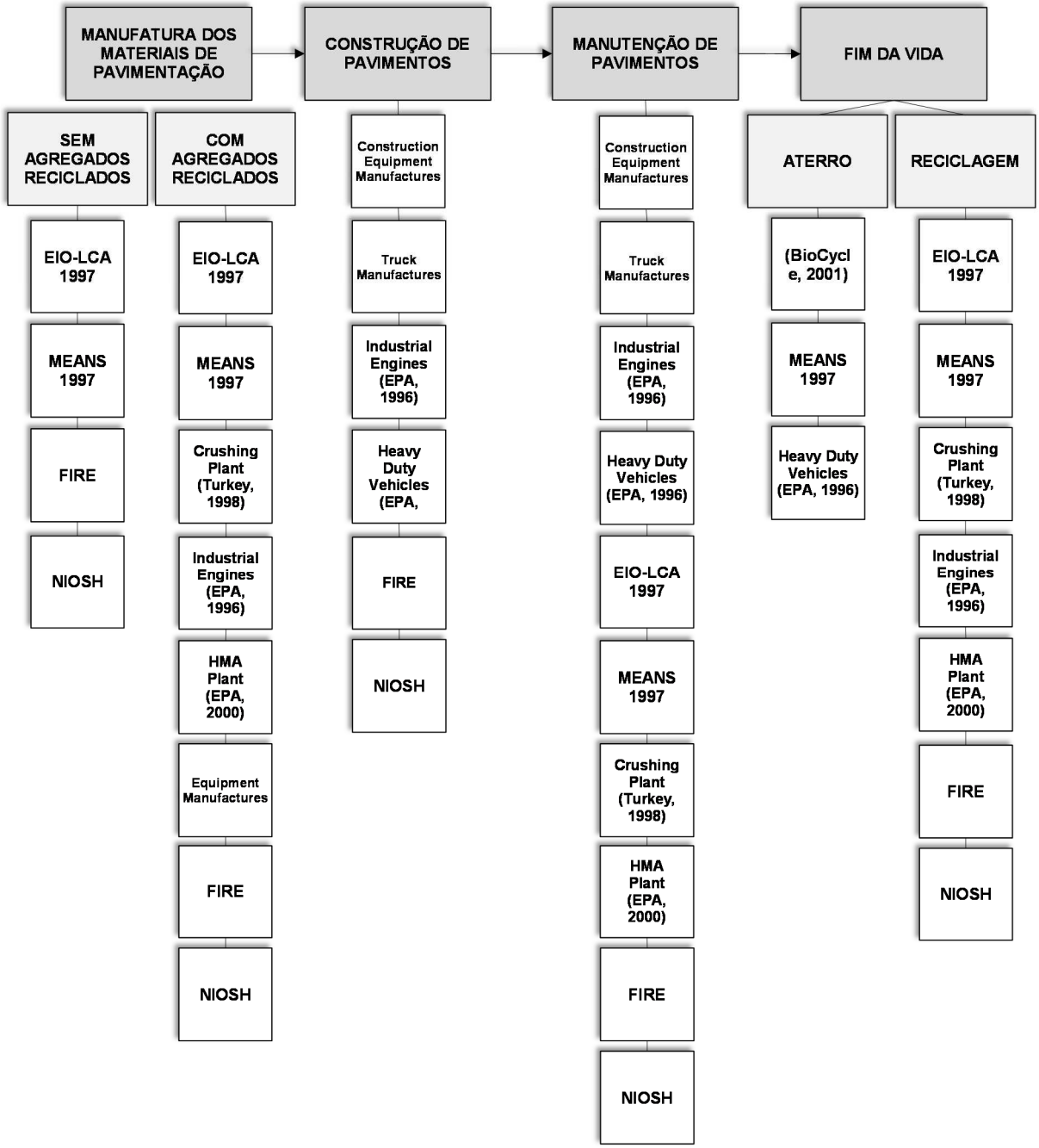


Figura 3.2 – Principais referências utilizadas na compilação do PaLATE (adaptado de HORVATH, 2004a)

Conforme citado anteriormente, o PaLATE é uma ferramenta baseada em planilhas de Excel. São, no total, 17 planilhas sendo uma de introdução e apresentação; 7 de inserção de variáveis e apresentação de resultados; uma com a lista de referências bibliográficas e as demais com dados pertinentes retirados das referências além de

fluxogramas e diagramas indicativos de cada etapa na implementação da via. As planilhas funcionam como etapas de cálculo dentro da ferramenta.

Tabela 3.1 – Descrições das Planilhas de Cálculo do PaLATE

Planilha	Tipo	Descrição
Introduction	Informativo	Informações iniciais sobre cada aba e funcionamento do programa
Design	Input	Informações da via. Larguras de faixa, extensão e espessuras das camadas do pavimento
Initial Construction	Input	Quantidades dos materiais utilizados na construção e distâncias de transporte dos mesmos
Maintenance	Input	Quantidades dos materiais utilizados na manutenção e distâncias de transporte dos mesmos
Equipaments	Input	Dados dos equipamentos utilizados na produção dos materiais e na construção e manutenção da via
Costs	Input	Custos dos materiais utilizados e demais dados para análise econômica
Costs Results	Output	Resultados da análise econômica
Env. Results	Output	Resultados dos cálculos de emissão de combustíveis

A seguir são descritas as principais planilhas de entrada e saída de dados do PaLATE:

3.1.3.1 Dados do Projeto *(Design)*

Nesta etapa, devem ser inseridas as informações referentes à geometria da via, como extensão e largura do leito carroçável, assim como os dados referentes à estrutura do pavimento como espessura e tipo de material a ser utilizado.

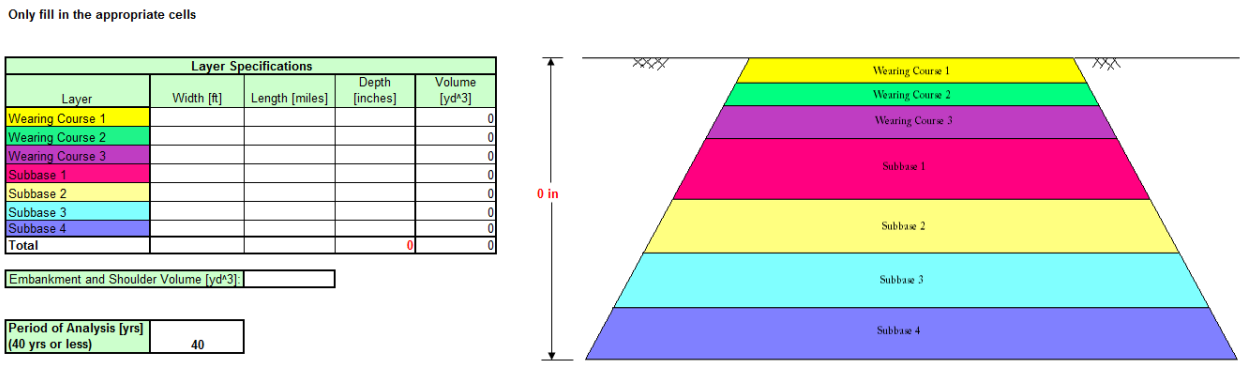


Figura 3.3 – Planilha *Design*

Para a estrutura do pavimento, o programa vem preparado para quatro tipos diferentes de camadas de revestimento (*Wearing Courses*) e outras quatro camadas para base e sub-base do pavimento (*Subbase*) como pode ser observado na Figura 3.3.

3.1.3.2 Quantidades de Materiais de Construção e de Restauração (*Initial Construction / Maintence Construction*)

Ambas são compostas por tabelas distintas para cada camada do pavimento onde nestas são descriminados diversos materiais para uma mesma camada, cabendo ao usuário preencher a quantidade de cada material em volume assim como as respectivas distâncias de transporte e tipos de veículos a serem utilizados em cada caso.

		Material	Density [tons/(yd^3)]	New Asphalt Pavement	New Concrete Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	Volume [yd^3]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	0	0		0	dump truck
		Bitumen	0,84	0			0	tanker truck
		Cement	1,27		0		0	barge
		Concrete Additives	0,84		0		0	tanker truck
		RAP	1,85	0	0		0	dump truck
		FRAP	1,85	0	0		0	dump truck
		RAS	1,12	0	0		0	dump truck
		RCA	1,88	0	0		0	dump truck
		Coal Fly Ash	2,20	0	0		0	cement truck
		Coal Bottom Ash	2,00	0	0		0	dump truck
		Blast Furnace Slag	1,72	0	0		0	dump truck
		Foundry Sand	1,50	0	0		0	dump truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0		0	dump truck
		Glass Cullet	1,93	0	0		0	dump truck
		Water	0,84		0			
		Steel Reinforcing Bars	0,24		0		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**0**			0	dump truck
		Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		**0**		0	mixing truck
	Waste material to landfill	RAP from site to landfill	1,85	0			0	dump truck
		RAS from site to landfill	1,12	0	0		0	dump truck
		RCM from site to landfill	1,88		0		0	dump truck

Figura 3.4 – Planilha *Initial Construction*

Nestas planilhas encontram-se também os dados referentes aos veículos de transporte dos materiais, porém já preenchidos com valores *default*, que podem ser alterados caso necessário.

3.1.3.3 Dados dos Equipamentos (*Equipment*)

As informações de capacidade do motor, produtividade, consumo e tipo de combustível relacionadas aos equipamentos utilizados na construção e manutenção das vias, são encontradas nesta aba. Os equipamentos estão divididos por tipo de serviço, logo é possível que um mesmo equipamento apareça mais de uma vez nesta etapa do programa.

O usuário deve entrar com o modelo de cada equipamento ou definir os valores de entrada caso o equipamento considerado na análise não esteja listado.

ACTIVITY	Equipment	Brand/Model		Engine Capacity	Productivity	Fuel Consumption	Fuel Type
Concrete Paving	Slipform paver	Wirtgen SP 250		106 hp	564 tons/h	19,7 l/h	diesel
	Texture curing machine	Gomaco T/C 400		70 hp	187 tons/h	20,2 l/h	diesel
Asphalt Paving	Paver	Dynapac F30C		196 hp	2.400 tons/h	49,1 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132		100 hp	668 tons/h	26,1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110		125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Cold in Place Recycling	CIR recycler	Wirtgen 2200 CR		800 hp	1.713 tons/h	150,00 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP134		100 hp	884 tons/h	25,1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110		125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Full Depth Reclamation	Asphalt road reclaimer	Wirtgen WR 2500 S		670 hp	4.800 tons/h	120,0 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D		150 hp	1.832 tons/h	37,6 l/h	diesel
Hot In Place Recycling	Heating machine	Wirtgen HM4500		49 hp	256 tons/h	9,1 l/h	diesel
	Asphalt remixer	Wirtgen 4500		295 hp	208 tons/h	55,0 l/h	diesel
	Pneumatic roller	Dynapac CP132		100 hp	668 tons/h	26,1 l/h	diesel
	Tandem roller	Ingersol rand DD110		125 hp	285 tons/h	32,7 l/h	diesel
Rubblization	Multi head breaker	Badger MHB Breaker		350 hp	520 tons/h	76,5 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D		150 hp	1.832 tons/h	37,6 l/h	diesel
Milling	Milling machine	Wirtgen W2200		875 hp	1.100 tons/h	156,2 l/h	diesel
Grinding	Grinding machine	CBI Magnum Force Shingle		1050 hp	115 tons/h	161,1 l/h	diesel
Concrete Demolition	Multi head breaker	Badger MHB Breaker		350 hp	520 tons/h	76,5 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 644E		160 hp	490 tons/h	40,1 l/h	diesel
Crushing Plant	Excavator	John Deere 690E		131 hp	225 tons/h	34,2 l/h	diesel
	Wheel loader	John Deere 624E		135 hp	225 tons/h	35,3 l/h	diesel
	Dozer	Caterpillar D8N		285 hp	225 tons/h	71,4 l/h	diesel
	Generator	Caterpillar 3406C TA		519 hp	225 tons/h	98,4 l/h	diesel
Excavation, placing and compaction	Excavator	John Deere 690E		131 hp	315 tons/h	34,2 l/h	diesel
	Vibratory soil compactor	Dynapac CA 262D		174 hp	1.832 tons/h	27,6 l/h	diesel

Figura 3.5 – Planilha *Equipment*

3.1.3.4 Custos (*Costs)*

Contém quatro tabelas de cálculo, sendo: Duas para os cálculos do cenário base e duas para os cálculos do cenário alternativo. Os cenários representam as combinações dos custos com os volumes iniciais de materiais e os custos de manutenção, descriminados em suas respectivas abas. Estes cenários diferem-se apenas por sua respectiva taxa interna de retorno (TIR). Valores anuais assim como o Valor Presente Líquido (VPL) são calculados separadamente para cada cenário.

Os custos unitários devem ser inseridos nestas tabelas tanto para o cenário base quanto para a alternativa. Ambas as tabelas terão como base os volumes já inseridos anteriormente. O usuário deve definir quais os anos de intervenção e quais os tipos de serviço a serem utilizados.

3.1.3.5 Resultados dos Custos (*Costs Results*)

Representações gráficas dos cálculos executados pela aba de custos. Nesta aba também são fornecidas as tabelas resumo das saídas de cálculo da análise econômica. Os mesmos serão detalhados em capítulo posterior.

3.1.3.6 Resultados da Análise Ambiental (*Environmental Results*)

Calcula os resultados da análise ambiental em muitos níveis diferentes. Na parte inferior direita da tabela, se encontram todos os valores da análise, separadamente por etapa, por tipo de material e por processo construtivo. Todos os valores apresentados nestas tabelas são somados e resumidos na parte superior direita da tabela, ainda divididos nas fases do ciclo de vida. O resumo final, se encontra na parte superior esquerda da planilha. A aba ainda provê representações gráficas dos dados, tanto individualizados, quanto agrupados. Os tipos de resultados apresentados serão analisados em capítulo posterior

3.1.4 Deficiências do Programa

Apesar do programa PaLATE ser capaz de quantificar emissões e consumo de energia, deve-se salientar que o mesmo não é capaz de simular todas as diferentes situações, materiais e técnicas adotadas no projeto e construção de uma rodovia. As principais deficiências notadas durante a utilização do programa apontam problemas na escolha e identificação do material e na escolha do método construtivo.

Para os materiais, há dificuldade na separação e escolha de materiais granulares com diferentes granulometrias. Não existe a possibilidade de compor um material com mais ou menos finos, sendo o usuário, incapaz de simular ou compor outro tipo de material que não sejam os padrões do programa. Ainda nos materiais, o PaLATE possui materiais que não fazem parte da realidade brasileira de projeto e construção, como é o caso da utilização de vidro reciclado como agregado para revestimentos e telhas asfálticas trituradas e recicladas para utilização como agregado tanto no revestimento quanto nas camadas de base e sub-base. Ao passo que o programa contempla materiais incomuns à nossa realidade, ele não traz em sua base de dados materiais como a Cal que é amplamente utilizada como estabilizante de camadas de base e sub-base no Brasil.

Quanto aos métodos de execução, sabe-se que novas tecnologias como misturas asfálticas mornas, que trazem ganhos ambientais quando comparados com técnicas convencionais, são impossíveis de serem simuladas pelo programa pois o mesmo não contempla os modelos de consumo e emissão para tais técnicas.

3.2 PALATE – ANÁLISE UNITÁRIA

Buscando entender o funcionamento do programa PaLATE e principalmente o comportamento das emissões de poluente e consumo de energia que cada material produz, sugere-se uma avaliação unitária de diferentes tipos de materiais que são utilizados como revestimento, base e sub-base nas estruturas de pavimentos.

3.2.1 Metodologia

Inicialmente, buscou-se elencar diferentes tipos de materiais que poderiam ser inseridos no PaLATE considerando-se as limitações previamente citadas do mesmo. Desta forma, foram selecionados seis tipos diferentes de materiais de revestimento e catorze tipos de materiais de base e sub-base, conforme listado a seguir:

- Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) convencional;
- CBUQ com 2% de Borracha em volume;
- CBUQ com 3% de Borracha em volume;
- Camada Porosa de Atrito (CPA);
- *Stone Mastic Asphalt* (SMA);
- Concreto de Cimento Portland (CCP);
- Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) com 6% de cimento em volume;
- BGTC com 5% de cimento em volume;
- Brita Graduada Melhorada com Cimento (BGMC) com 3% de cimento em volume;
- BGMC com 1% de cimento em volume;
- Brita Graduada Simples (BGS);
- Solo-Brita;
- Solo-Brita Cimento;
- Rachão;
- Solo;
- Solo Melhorado com Cimento (SMC) com 3% de cimento em volume;
- SMC com 6% de cimento em volume;
- Solo-Cimento (SC) com 9% de cimento em volume;
- SC com 12% de cimento em volume;
- Concreto Compactado com Rolo (CCR).

No PaLATE os dados de entrada de cada material são representados através dos volumes dos mesmos. Visando uma simulação uniforme, adotou-se a espessura de 1,0 cm para todos os materiais em uma área que é composta de 3,50 m de largura de faixa em uma extensão de 1000 m e distância de transporte igual a 1,00 km. Desta forma, as emissões e consumos obtidos na simulação de cada material serão representadas como emissões/consumos por centímetro-quilometro-faixa por quilômetro transportado, tornando simples a comparação e análise dos resultados para cada um dos materiais.

Após a simulação, ordenou-se os resultados obtidos a fim de se obter um ranking de qual material polui/consome mais ou menos dependendo do poluente analisado.

3.2.2 Volumes Calculados

O volume inicial padrão representado em metros cúbicos resulta da multiplicação dos parâmetros adotados sendo estes 3,50 m de largura, 1000 m de extensão e 0,01 m de espessura.

$$Volume\ inicial = 3{,}50x1000x0{,}01 = 35m^3$$

O volume inicial atenderá de forma simples os requisitos do programa para materiais puros, como BGS e Rachão, por exemplo, porém, conforme descrito anteriormente, o PaLATE não possui em sua base de dados materiais compostos. Caso necessite simular o CBUQ, por exemplo, deve-se conhecer os volumes de agregado e betume para só então ser possível a composição do material no programa.

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros utilizados e suas respectivas referências para o cálculo do volume dos materiais compostos analisados.

Com os parâmetros foi possível a correta distribuição do volume inicial em cada componente dos materiais.

Os volumes resultantes em cada um dos materiais são apresentados no APÊNDICE A juntamente com os cálculos de emissão de poluentes e consumo de energia unitários.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados para materiais compostos

Material	Massa específica (kg/m³)	Consumo	Unidade	Fonte (P. Esp./Cons.)
CCP				
Cimento	-	380	kg/m³	SICRO
Aditivo	-	1,23	kg/m³	SICRO
Aço	-	8,5	kg/m³	Calculado
Agregados	-	-	kg/m³	-
CBUQ Convencional				
Betume	1137,92	5,5%	em peso	PaLATE/SICRO
Vazios		4,0%	em volume	Balbo
Agregados	-	-	kg/m³	-
CBUQ c/ Borracha				
Betume	1137,92	5,5%	em peso	PaLATE/SICRO
Borracha	1000	2% a 3%	em volume	SUCRANA/Balbo
Vazios		4%	em volume	Balbo
Agregados		-	kg/m³	-
CPA				
Betume	1137,92	4,0%	em peso	PaLATE/Balbo
Vazios		20,0%	em volume	Balbo
SMA				
Betume	1137,92	7,0%	em peso	PaLATE/Balbo
Vazios		4,0%	em volume	Balbo
BGTC				
Cimento	1661,1	5% e 6%	em volume	PaLATE/SICRO
Agregados	-	-	kg/m³	-
BGMC				
Cimento	1661,1	1% e 3%	em volume	PaLATE/SICRO
Agregados	-	-	kg/m³	-
Solo-Brita				
Agregados	-	64%	em volume	SICRO
Solo	-	36%	em volume	PaLATE/ET DER
Solo-Brita Cimen.				
Cimento	1661,1	4%	em peso	PaLATE/Projeto
Agregados	-	64%	em volume	SICRO
Solo	2132,0	31%	em peso	PaLATE/ET DER
SMC				
Cimento	1661,1	3% e 6%	em volume	PaLATE/Balbo
Solo	2132,0	-	em volume	PaLATE/ET DER
SC				
Cimento	1661,1	9% e 12%	em volume	PaLATE/Balbo
Solo	2132,0	-	em volume	PaLATE/ET DER
CCR				
Cimento	-	120	kg/m³	SICRO
Agregados	-	-	kg/m³	-

3.2.3 Emissão de Poluentes e Consumo de Energia

Realizou-se cada simulação em uma planilha única do PaLATE e os resultados estão apresentados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Resultados da Análise Unitária no PaLATE (para 1,0 cm, 1 faixa e 1,0km)

Material	Energia [MJ]	Consumo de Água [kg]	CO_2 [kg]	NO_x [g]	PM_{10} [g]
CBUQ Convencional	114.108	38,91	6.089	40.526	18.623
CBQ C/ 2% de Borracha	114.905	38,84	6.582	41.842	17.935
CBQ C/ 3% de Borracha	115.322	38,80	6.830	42.574	17.605
CPA	109.474	38,55	5.886	38.363	15.996
SMA	137.645	48,93	7.418	48.040	19.403
CCP	113.980	43,40	7.954	96.789	36.423
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	22.400	7,82	1.579	12.835	11.248
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	20.301	6,75	1.432	10.996	10.999
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	16.102	4,60	1.137	7.320	10.499
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	11.904	2,45	843	3.643	10.000
BGS	9.847	1,38	699	1.973	9.783
Solo-Brita	6.544	0,91	465	1.686	6.300
Solo-Brita Cimento	17.623	6,41	1.243	11.022	8.052
Rachão	14.589	2,05	1.035	2.922	14.425
Solo	672	0,06	50	1.176	109
SMC 3% Cimento em Vol.	7.245	3,33	512	6.715	1.148
SMC 6% Cimento em Vol.	13.817	6,59	973	12.254	2.187
SC 9% Cimento em Vol.	20.390	9,85	1.434	17.793	3.227
SC 12% Cimento em Vol.	26.962	13,11	1.895	23.331	4.266
CCR	20.588	6,88	1.452	11.379	11.061

Tabela 3.4 – Continuação dos Resultados da Análise Unitária no PaLATE (para 1,0 cm, 1 faixa e 1,0km)

Material	SO_2 [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]
CBUQ Convencional	934.218	22.526	0,157	7,590
CBQ C/ 2% de Borracha	937.235	22.605	0,157	7,657
CBQ C/ 3% de Borracha	938.749	22.650	0,157	7,691
CPA	782.696	22.264	0,157	7,536
SMA	941.060	28.241	0,200	9,572
CCP	74.320	47.887	0,147	9,968
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	12.411	4.879	0,012	1,267
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	10.458	4.230	0,010	1,090
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	6.551	2.932	0,006	0,736
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	2.645	1.634	0,002	0,381
BGS	702	999	0,000	0,206
Solo-Brita	477	721	0,000	0,140
Solo-Brita Cimento	10.385	4.042	0,010	1,045
Rachão	1.040	1.479	0,000	0,305
Solo	77	227	0,000	0,023
SMC 3% Cimento em Vol.	5.955	2.197	0,006	0,560
SMC 6% Cimento em Vol.	11.833	4.168	0,012	1,097
SC 9% Cimento em Vol.	17.711	6.138	0,018	1,634
SC 12% Cimento em Vol.	23.589	8.109	0,023	2,171
CCR	10.696	4.320	0,010	1,112

3.2.4 Resultados das Análises

De posse dos resultados, criou-se um ranking dos materiais em função de cada parâmetro poluente e de consumo.

Este tipo de análise busca auxiliar a etapa do dimensionamento e de seleção de estruturas ecoeficientes, facilitando o trabalho do projetista na escolha de materiais que agridem menos o meio ambiente.

Tabela 3.5 – Ranking dos materiais para o consumo de energia

Tipo	Energia [MJ/cm.km.faixa]
Solo	672
Solo-Brita	6.544
SMC 3% Cimento em Vol.	7.245
BGS	9.847
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	11.904
SMC 6% Cimento em Vol.	13.817
Rachão	14.589
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	16.102
Solo-Brita Cimento	17.623
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	20.301
SC 9% Cimento em Vol.	20.390
CCR	20.588
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	22.400
SC 12% Cimento em Vol.	26.962
CPA	109.474
CCP	113.980
CBUQ Convencional	114.108
CBQ C/ 2% de Borracha	114.905
CBQ C/ 3% de Borracha	115.322
SMA	137.645

Tabela 3.6 – Ranking dos materiais para o consumo de água

Tipo	Consumo de Água [kg/ cm.km.faixa]
Solo	0,06
Solo-Brita	0,91
BGS	1,38
Rachão	2,05
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	2,45
SMC 3% Cimento em Vol.	3,33
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	4,60
Solo-Brita Cimento	6,41
SMC 6% Cimento em Vol.	6,59
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	6,75
CCR	6,88
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	7,82
SC 9% Cimento em Vol.	9,85
SC 12% Cimento em Vol.	13,11
CPA	38,55
CBQ C/ 3% de Borracha	38,80
CBQ C/ 2% de Borracha	38,84
CBUQ Convencional	38,91
CCP	43,40
SMA	48,93

Tabela 3.7 – Ranking dos materiais para a emissão de CO_2

Tipo	CO_2 [kg/cm.km. faixa]
Solo	50
Solo-Brita	465
SMC 3% Cimento em Vol.	512
BGS	699
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	843
SMC 6% Cimento em Vol.	973
Rachão	1.035
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	1.137
Solo-Brita Cimento	1.243
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	1.432
SC 9% Cimento em Vol.	1.434
CCR	1.452
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	1.579
SC 12% Cimento em Vol.	1.895
CPA	5.886
CBUQ Convencional	6.089
CBQ C/ 2% de Borracha	6.582
CBQ C/ 3% de Borracha	6.830
SMA	7.418
CCP	7.954

Tabela 3.8 – Ranking dos materiais para a emissão de NO_X

Tipo	NO_x [g/cm.km. faixa]
Solo	1.176
Solo-Brita	1.686
BGS	1.973
Rachão	2.922
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	3.643
SMC 3% Cimento em Vol.	6.715
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	7.320
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	10.996
Solo-Brita Cimento	11.022
CCR	11.379
SMC 6% Cimento em Vol.	12.254
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	12.835
SC 9% Cimento em Vol.	17.793
SC 12% Cimento em Vol.	23.331
CPA	38.363
CBUQ Convencional	40.526
CBQ C/ 2% de Borracha	41.842
CBQ C/ 3% de Borracha	42.574
SMA	48.040
CCP	96.789

Tabela 3.9 – Ranking dos materiais para a emissão de PM_{10}

Tipo	PM_{10} [g/cm.km. faixa]
Solo	109
SMC 3% Cimento em Vol.	1.148
SMC 6% Cimento em Vol.	2.187
SC 9% Cimento em Vol.	3.227
SC 12% Cimento em Vol.	4.266
Solo-Brita	6.300
Solo-Brita Cimento	8.052
BGS	9.783
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	10.000
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	10.499
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	10.999
CCR	11.061
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	11.248
Rachão	14.425
CPA	15.996
CBQ C/ 3% de Borracha	17.605
CBQ C/ 2% de Borracha	17.935
CBUQ Convencional	18.623
SMA	19.403
CCP	36.423

Tabela 3.10 – Ranking dos materiais para a emissão de SO_2

Tipo	SO_2 [g/cm.km. faixa]
Solo	77
Solo-Brita	477
BGS	702
Rachão	1.040
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	2.645
SMC 3% Cimento em Vol.	5.955
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	6.551
Solo-Brita Cimento	10.385
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	10.458
CCR	10.696
SMC 6% Cimento em Vol.	11.833
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	12.411
SC 9% Cimento em Vol.	17.711
SC 12% Cimento em Vol.	23.589
CCP	74.320
CPA	782.696
CBUQ Convencional	934.218
CBQ C/ 2% de Borracha	937.235
CBQ C/ 3% de Borracha	938.749
SMA	941.060

Tabela 3.11 – Ranking dos materiais para a emissão de CO

Tipo	CO [g/cm.km. faixa]
Solo	227
Solo-Brita	721
BGS	999
Rachão	1.479
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	1.634
SMC 3% Cimento em Vol.	2.197
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	2.932
Solo-Brita Cimento	4.042
SMC 6% Cimento em Vol.	4.168
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	4.230
CCR	4.320
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	4.879
SC 9% Cimento em Vol.	6.138
SC 12% Cimento em Vol.	8.109
CPA	22.264
CBUQ Convencional	22.526
CBQ C/ 2% de Borracha	22.605
CBQ C/ 3% de Borracha	22.650
SMA	28.241
CCP	47.887

Tabela 3.12 – Ranking dos materiais para a emissão de Hg

Tipo	Hg [g/cm.km. faixa]
BGS	0,0003
Solo-Brita	0,0003
Rachão	0,0004
Solo	0,0005
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	0,0021
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	0,0059
SMC 3% Cimento em Vol.	0,0062
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	0,0097
Solo-Brita Cimento	0,0099
CCR	0,0099
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	0,0116
SMC 6% Cimento em Vol.	0,0118
SC 9% Cimento em Vol.	0,0175
SC 12% Cimento em Vol.	0,0232
CCP	0,1473
CPA	0,1573
CBQ C/ 2% de Borracha	0,1573
CBUQ Convencional	0,1573
CBQ C/ 3% de Borracha	0,1573
SMA	0,2001

Tabela 3.13 – Ranking dos materiais para a emissão de Pb

Tipo	Pb [g/cm.km. faixa]
Solo	0,023
Solo-Brita	0,140
BGS	0,206
Rachão	0,305
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	0,381
SMC 3% Cimento em Vol.	0,560
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	0,736
Solo-Brita Cimento	1,045
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	1,090
SMC 6% Cimento em Vol.	1,097
CCR	1,112
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	1,267
SC 9% Cimento em Vol.	1,634
SC 12% Cimento em Vol.	2,171
CPA	7,536
CBUQ Convencional	7,590
CBQ C/ 2% de Borracha	7,657
CBQ C/ 3% de Borracha	7,691
SMA	9,572
CCP	9,968

Pode-se observar grande variabilidade dos resultados dependendo do poluente ou do item de consumo a ser analisado. Em geral, nota-se que a utilização de solo aparece como uma solução ambientalmente mais favorável ao passo que o SMA e o CCP se alternam como os materiais de maior emissão dos poluentes citados e assim sendo mais prejudiciais ao meio ambiente. Obviamente, o contra ponto a esta conclusão, é que se tratam de materiais mais nobres e de maior durabilidade.

É possível notar que existe uma considerável separação entre os materiais de base/sub-base e os de revestimento. Os cinco materiais de revestimento em todas as análises aparecem como os mais poluentes.

3.2.5 Índices de Ecoeficiência

Devido à dificuldade na avaliação de limites e faixas de concentração máxima de poluentes, os valores apresentados no item anterior dificultam a aplicabilidade de uma avaliação da ecoeficiência de uma estrutura de pavimento no momento do dimensionamento da mesma.

Com isto, buscou-se uma maneira de modificar os dados obtidos nas simulações com intuito de facilitar a utilização do conceito de sustentabilidade no momento do projeto e construção de novas estruturas de pavimento.

A forma encontrada foi através do cálculo de índices individuas que avaliem a ecoeficiência de cada material analisado para cada tipo de poluente/consumo.

Os índices são calculados dividindo-se o consumo/emissão do material “n” pelo consumo/emissão do material de menor consumo/emissão do parâmetro analisado conforme mostra a equação (3.1. Assim, obtém-se quantas vezes mais um material é mais poluente do que outro, desvinculando-se, assim, dos valores encontrados.

$$IE = \frac{E_n}{E_1} \tag{3.1}$$

Onde:

IE=Índice de Ecoeficiência

En=Emissão/Consumo do material “n”;

E1=Emissão/Consumo do material de menor emissão/consumo;

Por exemplo, o solo foi o material de menor emissão de CO (227 g/cm.km.faixa) enquanto o Rachão emite 1.479 g/cm.km.faixa de CO. Utilizando a equação (3.1, o Índice de Ecoeficiência do Rachão para emissão de CO seria igual a 6,52, ou seja, a utilização de Rachão emite, aproximadamente 6,52 vezes mais CO do que a utilização de Solo como camada e base ou sub-base como mostra a equação (3.2.

$$IE_{CO-Rachão} = \frac{1479}{227} = 6{,}52 \tag{3.2}$$

Observa-se, que uma vez os índices calculados, para comparação entre materiais onde um deles não seja o menor dos poluentes, basta dividir um índice de ecoeficiência pelo outro para se obter um valor de comparação direta entre os dois.

Toma-se como exemplo novamente a emissão de CO. O IE do Rachão para este poluente é igual a 6,52 conforme calculado. O IE do Solo-Brita Cimento seria calculado da seguinte forma:

$$IE_{CO-Solo-Brita\ Cimento} = \frac{4042}{227} = 17{,}81 \tag{3.3}$$

Sabe-se que a utilização de Solo-Brita Cimento emite 17,81 vezes mais CO do que a utilização de solo, porém a relação entre Solo-Brita Cimento e Rachão não é clara com IE. Para tal, basta dividir os Índices de Ecoeficiência, pois estes, no fim, representam a divisão entre as reais emissões de ambos conforme pode ser observado na equação (3.4:

$$\frac{IE_{CO-Solo-Brita\ Cimento}}{IE_{CO-Rachão}} = \frac{17{,}81}{6{,}52} = 2{,}73 = \frac{4042}{1479} = \frac{E_{CO-Solo-Brita\ Cimento}}{E_{CO-Rachão}} \tag{3.4}$$

A tabelas a seguir apresentam os valores calculados dos Índices de Ecoeficiência (IE) separados por consumo/emissão para todos os materiais analisados.

Tabela 3.14 – Índice de Ecoeficiência para o consumo de energia

Tipo	$IE_{Energia}$
Solo	1,00
Solo-Brita	9,74
SMC 3% Cimento em Vol.	10,78
BGS	14,65
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	17,71
SMC 6% Cimento em Vol.	20,56
Rachão	21,70
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	23,96
Solo-Brita Cimento	26,22
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	30,20
SC 9% Cimento em Vol.	30,33
CCR	30,63
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	33,32
SC 12% Cimento em Vol.	40,11
CPA	162,87
CCP	169,57
CBUQ Convencional	169,76
CBQ C/ 2% de Borracha	170,95
CBQ C/ 3% de Borracha	171,57
SMA	204,78

Tabela 3.15 – Índice de Ecoeficiência para o consumo de água

Tipo	$IE_{Água}$
Solo	1,00
Solo-Brita	13,96
BGS	21,26
Rachão	31,49
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	37,68
SMC 3% Cimento em Vol.	51,20
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	70,73
Solo-Brita Cimento	98,58
SMC 6% Cimento em Vol.	101,39
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	103,79
CCR	105,84
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	120,32
SC 9% Cimento em Vol.	151,59
SC 12% Cimento em Vol.	201,78
CPA	593,20
CBQ C/ 3% de Borracha	597,09
CBQ C/ 2% de Borracha	597,63
CBUQ Convencional	598,79
CCP	667,80
SMA	752,95

Tabela 3.16 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de CO_2

Tipo	IE_{CO2}
Solo	1,00
Solo-Brita	9,23
SMC 3% Cimento em Vol.	10,15
BGS	13,85
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	16,71
SMC 6% Cimento em Vol.	19,29
Rachão	20,52
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	22,55
Solo-Brita Cimento	24,64
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	28,39
SC 9% Cimento em Vol.	28,44
CCR	28,80
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	31,31
SC 12% Cimento em Vol.	37,58
CPA	116,71
CBUQ Convencional	120,72
CBQ C/ 2% de Borracha	130,50
CBQ C/ 3% de Borracha	135,42
SMA	147,08
CCP	157,72

Tabela 3.17 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de NO_X

Tipo	IE_{NOX}
Solo	1,00
Solo-Brita	1,43
BGS	1,68
Rachão	2,48
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	3,10
SMC 3% Cimento em Vol.	5,71
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	6,22
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	9,35
Solo-Brita Cimento	9,37
CCR	9,67
SMC 6% Cimento em Vol.	10,42
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	10,91
SC 9% Cimento em Vol.	15,13
SC 12% Cimento em Vol.	19,83
CPA	32,61
CBUQ Convencional	34,45
CBQ C/ 2% de Borracha	35,57
CBQ C/ 3% de Borracha	36,19
SMA	40,84
CCP	82,28

Tabela 3.18 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de PM_{10}

Tipo	IE_{PM10}
Solo	1,00
SMC 3% Cimento em Vol.	10,56
SMC 6% Cimento em Vol.	20,13
SC 9% Cimento em Vol.	29,69
SC 12% Cimento em Vol.	39,26
Solo-Brita	57,98
Solo-Brita Cimento	74,11
BGS	90,04
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	92,03
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	96,63
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	101,22
CCR	101,79
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	103,52
Rachão	132,76
CPA	147,22
CBQ C/ 3% de Borracha	162,02
CBQ C/ 2% de Borracha	165,06
CBUQ Convencional	171,40
SMA	178,57
CCP	335,21

Tabela 3.19 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de SO_2

Tipo	IE_{SO2}
Solo	1,00
Solo-Brita	6,23
BGS	9,17
Rachão	13,59
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	34,56
SMC 3% Cimento em Vol.	77,79
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	85,59
Solo-Brita Cimento	135,67
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	136,62
CCR	139,74
SMC 6% Cimento em Vol.	154,59
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	162,14
SC 9% Cimento em Vol.	231,38
SC 12% Cimento em Vol.	308,17
CCP	970,95
CPA	10.225,42
CBUQ Convencional	12.204,95
CBQ C/ 2% de Borracha	12.244,37
CBQ C/ 3% de Borracha	12.264,14
SMA	12.294,34

Tabela 3.20 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de CO

Tipo	IE_{CO}
Solo	1,00
Solo-Brita	3,18
BGS	4,41
Rachão	6,53
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	7,21
SMC 3% Cimento em Vol.	9,69
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	12,94
Solo-Brita Cimento	17,83
SMC 6% Cimento em Vol.	18,39
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	18,66
CCR	19,06
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	21,53
SC 9% Cimento em Vol.	27,08
SC 12% Cimento em Vol.	35,78
CPA	98,24
CBUQ Convencional	99,39
CBQ C/ 2% de Borracha	99,74
CBQ C/ 3% de Borracha	99,94
SMA	124,61
CCP	211,29

Tabela 3.21 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de Hg

Tipo	IE_{Hg}
BGS	0,52
Solo-Brita	0,69
Rachão	0,77
Solo	1,00
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	4,36
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	12,16
SMC 3% Cimento em Vol.	12,68
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	19,95
Solo-Brita Cimento	20,39
CCR	20,47
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	23,85
SMC 6% Cimento em Vol.	24,36
SC 9% Cimento em Vol.	36,05
SC 12% Cimento em Vol.	47,73
CCP	303,30
CPA	323,81
CBQ C/ 2% de Borracha	323,92
CBUQ Convencional	323,93
CBQ C/ 3% de Borracha	323,94
SMA	412,08

Tabela 3.22 – Índice de Ecoeficiência para a emissão de Pb

Tipo	IE_{Pb}
Solo	1,00
Solo-Brita	6,19
BGS	9,10
Rachão	13,48
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	16,88
SMC 3% Cimento em Vol.	24,77
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	32,56
Solo-Brita Cimento	46,25
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	48,25
SMC 6% Cimento em Vol.	48,54
CCR	49,23
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	56,09
SC 9% Cimento em Vol.	72,30
SC 12% Cimento em Vol.	96,07
CPA	333,50
CBUQ Convencional	335,89
CBQ C/ 2% de Borracha	338,85
CBQ C/ 3% de Borracha	340,36
SMA	423,59
CCP	441,11

As análises mostram que o solo possui os menores valores de emissões em todas as análises com exceção da emissão de Hg. Neste caso, com intuito de normalizar os demais resultados, os Índices de Ecoeficiência do Mercúrio foram calculados com relação às emissões de Hg do solo fazendo com que alguns dos materiais tivessem Índices de Ecoeficiência menores do que 1.

Apesar dos Índices de Ecoeficiência ajudarem na escolha dos materiais analisando individualmente cada poluente, ainda é difícil a análise de todos os poluentes em conjunto. Desta forma, buscam-se outras maneiras que permitam a análise completa dos materiais.

3.2.6 Análise de Ecoeficiência da BASF

Uma das maiores empresas da indústria química, a BASF desenvolveu uma ferramenta para análise de ecoeficiência na produção de seus produtos químicos. Desenvolvida por Peter Saling, diretor de sustentabilidade da BASF e sua equipe de pesquisadores, a ferramenta de análise, que nada mais é do que uma metodologia de quantificação da emissão de poluentes e análise destes dados, foi não só amplamente

utilizada na indústria química, mas também transportada para outras indústrias como sugerido por Miller e Bahia (2009) para utilização da metodologia na avaliação de tecnologias sustentáveis de pavimentação.

Segundo Saling *et al.*(2002), o objetivo do estudo era desenvolver uma ferramenta que seria de simples utilização para pessoas com experiência em Análise do Ciclo de Vida e que fosse de fácil entendimento para leigos no assunto. Saling enfatiza a importância de os resultados serem apresentados de uma forma que estudos complexos sejam compreendidos de maneira simples e rápida.

Para tal, dentre outros avanços que as pesquisas da BASF conquistaram, foi proposta uma maneira de simplificar diversos tipos de dados em um único gráfico que é capaz de traduzir qual método de produção era mais ecoeficiênte. Este gráfico foi denominado de *Environmental Fingerprint* (Impressão digital ambiental em tradução livre)

3.2.6.1 Impressão Digital Ambiental

Os gráficos das impressões digitais ambientais desenvolvido pela BASF tem um formato de pentágono incluindo cinco diferentes escalas que vão de 0,00 a 1,00, partindo do centro geométrico do pentágono e terminando cada uma em um vértice da figura, sendo que os valores mais próximos de 1,00 são os ambientalmente mais prejudiciais. As escalas são para Consumo de Energia, Emissões, Potencial Tóxico, Potencial de Risco e Consumo de Materiais. A Figura 3.6 demostra um exemplo de um gráfico de impressões digitais ambientais.

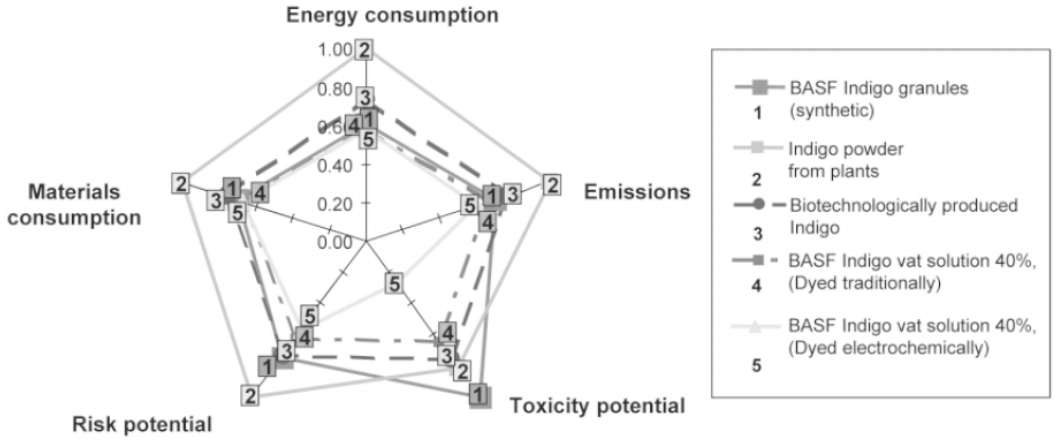


Figura 3.6 – *Environmental Fingerprints* (Saling et. al, 2002)

Especificamente, para pavimentação, Miller e Bahia (2009), em um de seus estudos e análises de técnicas sustentáveis, sugeriram a utilização de gráfico similar com a inclusão de mais uma escala para uso do solo, transformando o gráfico em um hexágono como pode ser observado na Figura 3.7.

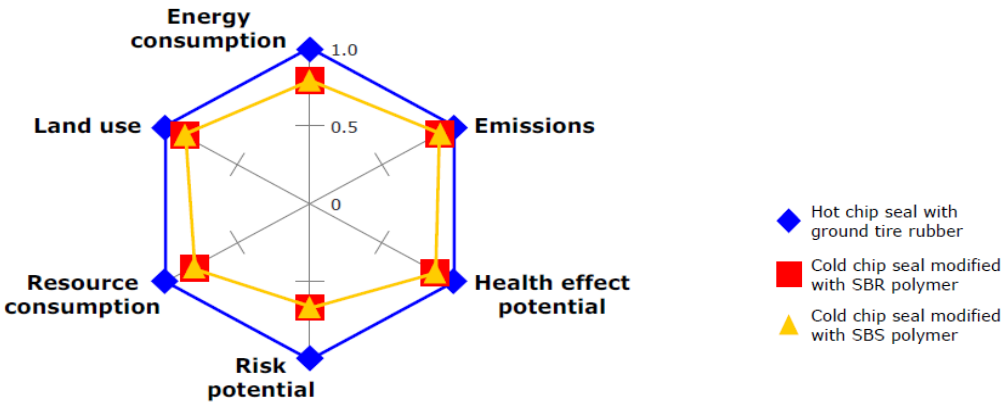


Figura 3.7 – *Environmental Fingerprints* aplicados a pavimentação (Miller e Bahia, 2009)

A utilização de um gráfico como este torna muito simples a avaliação da ecoeficiência de diferentes soluções e/ou processos de produção pois a visualização gráfica proposta traduz diversos valores de diferentes parâmetros a apenas uma figura geométrica onde as impressões digitais ambientais de menor área são as mais ecoeficientes. Com isto, Saling consegue atingir seu objetivo inicial, traduzindo de forma simples, estudos de elevado grau de complexidade.

Estes ábacos somente são possíveis de construir com a atribuição de pesos e normalização dos dados.

3.2.6.2 Sugestão: Gráfico de Impressão Digital Ambiental

Com base na pesquisa desenvolvida pela BASF e tendo em vista a aplicação similar desenvolvida por Miller e Bahia (2009), sugere-se a criação de gráfico de impressão digital ambiental para avaliação da ecoeficiência de diferentes tipos de materiais cuja utilização seria uma etapa complementar da análise técnico-econômica-ambiental no momento da escolha dos materiais.

Inicialmente, é sugerida a utilização dos dados de todos os poluentes e itens de consumo estudados até aqui, ou seja: consumos de água e energia e; emissões de CO_2, NO_X, PM_{10}, SO_2, CO, Hg e Pb. Considerando a utilização destes 9 itens, o gráfico

a ser proposto terá forma de eneágono regular, com a inserção de nove escalas de 0,0 a 1,0.

Para a criação das escalas, optou-se pela normalização dos Índices de Ecoeficiência encontrados e apresentados no tópico anterior. A normalização consiste em dividir cada IE pelo maior IE do item de consumo ou poluente em questão. O resultado da normalização é apresentado nas tabelas a seguir onde a coluna IEN, apresenta o Índice de Ecoeficiência Normalizado.

Tabela 3.23 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para o consumo de energia

Tipo	$IE_{Energia}$	$IEN_{Energia}$
Solo	1,00	0,005
Solo-Brita	9,74	0,048
SMC 3% Cimento em Vol.	10,78	0,053
BGS	14,65	0,072
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	17,71	0,086
SMC 6% Cimento em Vol.	20,56	0,100
Rachão	21,70	0,106
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	23,96	0,117
Solo-Brita Cimento	26,22	0,128
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	30,20	0,147
SC 9% Cimento em Vol.	30,33	0,148
CCR	30,63	0,150
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	33,32	0,163
SC 12% Cimento em Vol.	40,11	0,196
CPA	162,87	0,795
CCP	169,57	0,828
CBUQ Convencional	169,76	0,829
CBQ C/ 2% de Borracha	170,95	0,835
CBQ C/ 3% de Borracha	171,57	0,838
SMA	204,78	1,000

Tabela 3.24 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para o consumo de água

Tipo	$IE_{Água}$	$IEN_{Água}$
Solo	1,00	0,001
Solo-Brita	13,96	0,019
BGS	21,26	0,028
Rachão	31,49	0,042
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	37,68	0,050
SMC 3% Cimento em Vol.	51,20	0,068
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	70,73	0,094
Solo-Brita Cimento	98,58	0,131
SMC 6% Cimento em Vol.	101,39	0,135
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	103,79	0,138
CCR	105,84	0,141
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	120,32	0,160
SC 9% Cimento em Vol.	151,59	0,201
SC 12% Cimento em Vol.	201,78	0,268
CPA	593,20	0,788
CBQ C/ 3% de Borracha	597,09	0,793
CBQ C/ 2% de Borracha	597,63	0,794
CBUQ Convencional	598,79	0,795
CCP	667,80	0,887
SMA	752,95	1,000

Tabela 3.25 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de CO_2

Tipo	IE_{CO2}	IEN_{CO2}
Solo	1,00	0,006
Solo-Brita	9,23	0,059
SMC 3% Cimento em Vol.	10,15	0,064
BGS	13,85	0,088
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	16,71	0,106
SMC 6% Cimento em Vol.	19,29	0,122
Rachão	20,52	0,130
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	22,55	0,143
Solo-Brita Cimento	24,64	0,156
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	28,39	0,180
SC 9% Cimento em Vol.	28,44	0,180
CCR	28,80	0,183
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	31,31	0,199
SC 12% Cimento em Vol.	37,58	0,238
CPA	116,71	0,740
CBUQ Convencional	120,72	0,765
CBQ C/ 2% de Borracha	130,50	0,827
CBQ C/ 3% de Borracha	135,42	0,859
SMA	147,08	0,933
CCP	157,72	1,000

Tabela 3.26 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de NO_X

Tipo	IE_{NOX}	IEN_{NOX}
Solo	1,00	0,012
Solo-Brita	1,43	0,017
BGS	1,68	0,020
Rachão	2,48	0,030
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	3,10	0,038
SMC 3% Cimento em Vol.	5,71	0,069
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	6,22	0,076
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	9,35	0,114
Solo-Brita Cimento	9,37	0,114
CCR	9,67	0,118
SMC 6% Cimento em Vol.	10,42	0,127
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	10,91	0,133
SC 9% Cimento em Vol.	15,13	0,184
SC 12% Cimento em Vol.	19,83	0,241
CPA	32,61	0,396
CBUQ Convencional	34,45	0,419
CBQ C/ 2% de Borracha	35,57	0,432
CBQ C/ 3% de Borracha	36,19	0,440
SMA	40,84	0,496
CCP	82,28	1,000

Tabela 3.27 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de PM_{10}

Tipo	IE_{PM10}	IEN_{PM10}
Solo	1,00	0,003
SMC 3% Cimento em Vol.	10,56	0,032
SMC 6% Cimento em Vol.	20,13	0,060
SC 9% Cimento em Vol.	29,69	0,089
SC 12% Cimento em Vol.	39,26	0,117
Solo-Brita	57,98	0,173
Solo-Brita Cimento	74,11	0,221
BGS	90,04	0,269
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	92,03	0,275
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	96,63	0,288
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	101,22	0,302
CCR	101,79	0,304
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	103,52	0,309
Rachão	132,76	0,396
CPA	147,22	0,439
CBQ C/ 3% de Borracha	162,02	0,483
CBQ C/ 2% de Borracha	165,06	0,492
CBUQ Convencional	171,40	0,511
SMA	178,57	0,533
CCP	335,21	1,000

Tabela 3.28 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de SO_2

Tipo	IE_{SO2}	IEN_{SO2}
Solo	1,00	0,000
Solo-Brita	6,23	0,001
BGS	9,17	0,001
Rachão	13,59	0,001
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	34,56	0,003
SMC 3% Cimento em Vol.	77,79	0,006
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	85,59	0,007
Solo-Brita Cimento	135,67	0,011
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	136,62	0,011
CCR	139,74	0,011
SMC 6% Cimento em Vol.	154,59	0,013
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	162,14	0,013
SC 9% Cimento em Vol.	231,38	0,019
SC 12% Cimento em Vol.	308,17	0,025
CCP	970,95	0,079
CPA	10.225,42	0,832
CBUQ Convencional	12.204,95	0,993
CBQ C/ 2% de Borracha	12.244,37	0,996
CBQ C/ 3% de Borracha	12.264,14	0,998
SMA	12.294,34	1,000

Tabela 3.29 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de CO

Tipo	IE_{CO}	IEN_{CO}
Solo	1,00	0,005
Solo-Brita	3,18	0,015
BGS	4,41	0,021
Rachão	6,53	0,031
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	7,21	0,034
SMC 3% Cimento em Vol.	9,69	0,046
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	12,94	0,061
Solo-Brita Cimento	17,83	0,084
SMC 6% Cimento em Vol.	18,39	0,087
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	18,66	0,088
CCR	19,06	0,090
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	21,53	0,102
SC 9% Cimento em Vol.	27,08	0,128
SC 12% Cimento em Vol.	35,78	0,169
CPA	98,24	0,465
CBUQ Convencional	99,39	0,470
CBQ C/ 2% de Borracha	99,74	0,472
CBQ C/ 3% de Borracha	99,94	0,473
SMA	124,61	0,590
CCP	211,29	1,000

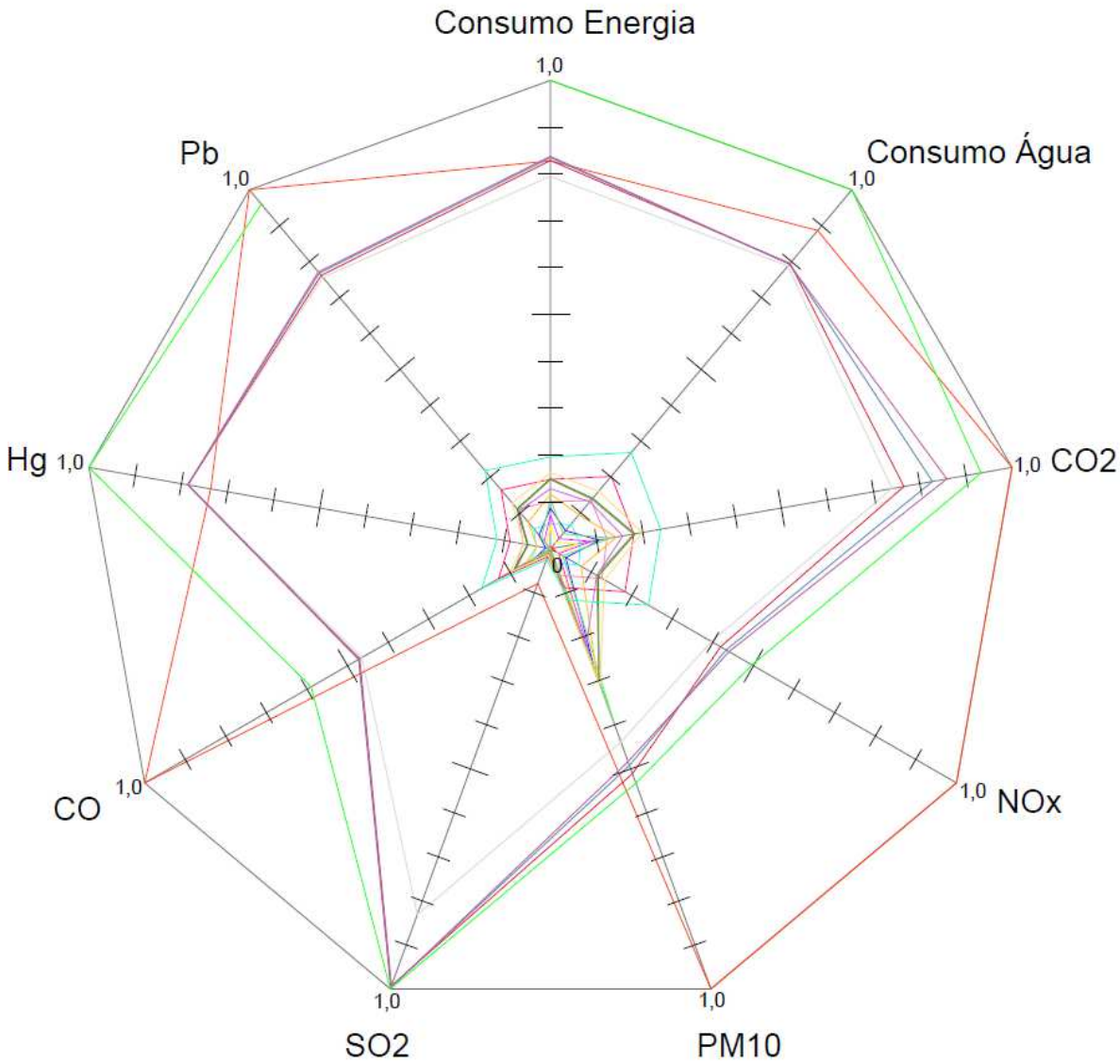
Tabela 3.30 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de Hg

Tipo	IE_{Hg}	IEN_{Hg}
BGS	0,52	0,001
Solo-Brita	0,69	0,002
Rachão	0,77	0,002
Solo	1,00	0,002
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	4,36	0,011
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	12,16	0,029
SMC 3% Cimento em Vol.	12,68	0,031
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	19,95	0,048
Solo-Brita Cimento	20,39	0,049
CCR	20,47	0,050
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	23,85	0,058
SMC 6% Cimento em Vol.	24,36	0,059
SC 9% Cimento em Vol.	36,05	0,087
SC 12% Cimento em Vol.	47,73	0,116
CCP	303,30	0,736
CPA	323,81	0,786
CBQ C/ 2% de Borracha	323,92	0,786
CBUQ Convencional	323,93	0,786
CBQ C/ 3% de Borracha	323,94	0,786
SMA	412,08	1,000

Tabela 3.31 – Índice de Ecoeficiência Normalizado para a emissão de Pb

Tipo	IE_{Pb}	IEN_{Pb}
Solo	1,00	0,002
Solo-Brita	6,19	0,014
BGS	9,10	0,021
Rachão	13,48	0,031
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	16,88	0,038
SMC 3% Cimento em Vol.	24,77	0,056
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	32,56	0,074
Solo-Brita Cimento	46,25	0,105
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	48,25	0,109
SMC 6% Cimento em Vol.	48,54	0,110
CCR	49,23	0,112
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	56,09	0,127
SC 9% Cimento em Vol.	72,30	0,164
SC 12% Cimento em Vol.	96,07	0,218
CPA	333,50	0,756
CBUQ Convencional	335,89	0,761
CBQ C/ 2% de Borracha	338,85	0,768
CBQ C/ 3% de Borracha	340,36	0,772
SMA	423,59	0,960
CCP	441,11	1,000

Com os valores de IEN, basta plotar as figuras geométricas para cada material. A Figura 3.8 apresenta o gráfico de impressões digitais ambientais sugerido.



LEGENDA

- Solo
- Brita Graduada Simples
- Rachão
- Solo-Brita
- Solo-Brita Cimento
- Solo Melhorado c/ Cimento (3% em Vol.)
- Solo Melhorado c/ Cimento (6% em Vol.)
- Solo-Cimento (9% em Vol.)
- Solo-Cimento (12% em Vol.)
- Brita Graduada Melhorada c/ Cimento (1% em Vol.)
- Brita Graduada Melhorada c/ Cimento (3% em Vol.)
- Brita Graduada Tratada c/ Cimento (5% em Vol.)
- Brita Graduada Tratada c/ Cimento (6% em Vol.)
- Concreto Compactado com Rolo
- Concreto Betuminoso Usinado à Quente
- Concreto Betuminoso Usinado à Quente c/ Borracha (2% em Vol.)
- Concreto Betuminoso Usinado à Quente c/ Borracha (3% em Vol.)
- Camada Porosa de Atrito
- Stone Mastic Asphalt
- Concreto de Cimento Portland

Figura 3.8 – Gráfico de Impressões Digitais Ambientais Sugerido

A solução gráfica, em teoria, deveria proporcionar uma forma mais clara de visualização e comparação entre os materiais, porém, dado a quantidade de materiais e parâmetros estudados, a visualização de alguns materiais, como o solo por exemplo, é prejudicada.

Sendo assim, sugere-se, adicionalmente à solução gráfica, o cálculo da área de cada figura, uma vez que quanto menor a área da figura geométrica, mais ecoeficiente é o material.

3.2.6.3 Área das figuras geradas

Para o cálculo da área de cada figura, é sugerido a utilização de fórmula da geometria básica para cálculo de áreas de polígonos não regulares. Este cálculo é comumente utilizado na topografia para encontrar áreas de poligonais fechadas. A seguir é apresentada a equação (3.5 com fórmula geral simplificada para quando todos vértices estiverem com o mesmo ângulo entre eles e figura exemplificando as variáveis

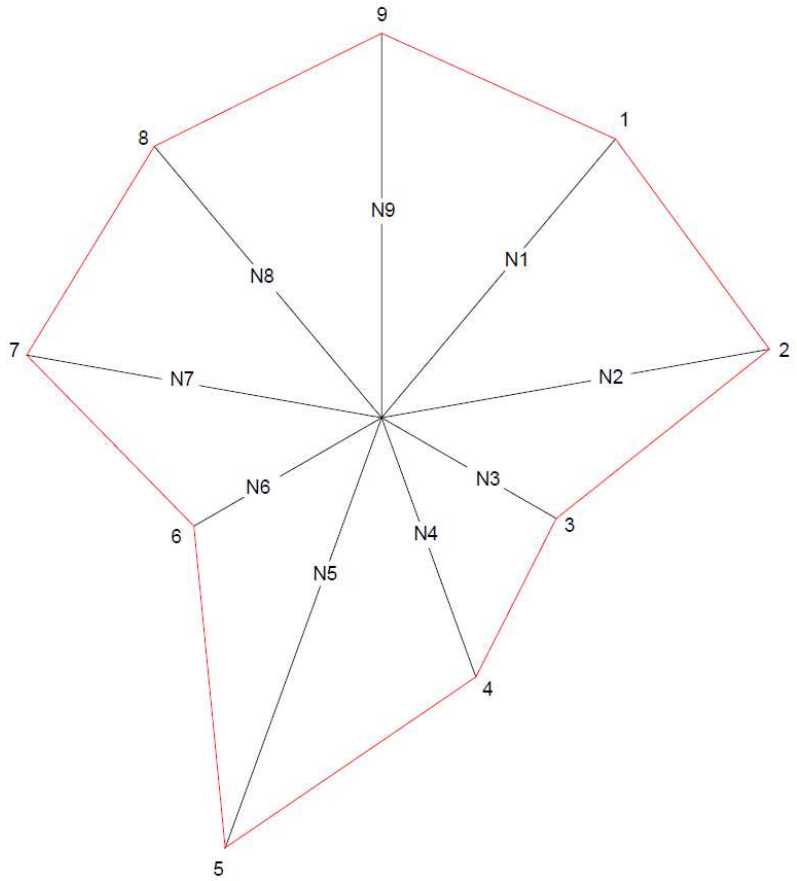


Figura 3.9 – Exemplo de Polígono

$$A = \frac{1}{2}\left(\left(\sum_{i=1}^{n} N_i \cdot N_{i+1}\right) + N_n \cdot N_1\right) \cdot \sin\left(\frac{360}{n}\right) \quad (3.5)$$

Onde:

N_i = Valor do centro da figura até o vértice i;

n = Número total de vértices da figura.

Vale ressaltar que a utilização da fórmula não restringe nem a ordem, nem o número de itens de consumo e poluentes analisados, ou seja, a mesma abrange diferentes quantidades de itens de consumo e poluentes em diferentes composições/ordens.

Aplicando a fórmula é possível encontrar a área de cada figura e, por fim, apresentar um ranking definitivo dos materiais estudados. A Tabela 3.32 apresenta os valores de área calculados já em ordem crescente.

Tabela 3.32 – Ranking de Ecoeficiência dos Materiais Estudados

Tipo	Área	Posição
Solo	5,04E-05	1
Solo-Brita	0,002	2
BGS	0,004	3
SMC 3% Cimento em Vol.	0,007	4
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	0,009	5
Rachão	0,010	6
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	0,023	7
SMC 6% Cimento em Vol.	0,025	8
Solo-Brita Cimento	0,034	9
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	0,042	10
CCR	0,043	11
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	0,053	12
SC 9% Cimento em Vol.	0,054	13
SC 12% Cimento em Vol.	0,095	14
CPA	1,282	15
CBUQ Convencional	1,407	16
CBQ C/ 2% de Borracha	1,436	17
CBQ C/ 3% de Borracha	1,451	18
CCP	1,954	19
SMA	2,022	20

Como referência, a área máxima que se pode obter neste caso seria aproximadamente igual a 2,89. Para isto, todos os valores de IEN teriam de ser iguais a 1,00.

Cabe relembrar que os valores de área apresentados são para um centímetro de espessura de cada material. Logo, uma maneira de considerar a análise para uma estrutura completa seria por meio da ponderação dos valores de área com as espessuras de cada camada. A equação (3.6) indica como este cálculo é feito.

$$A_p = \frac{(\sum_{i=1}^{n} A_i \cdot h_i)}{(\sum_{i=1}^{n} h_i)} \tag{3.6}$$

Onde:

A_p = Área ponderada equivalente da estrutura;

A_i = Área do material "i" considerado;

h_i = Espessura da camada de material "i".

Como exemplo de aplicação adotam-se dois tipos distintos de estruturas, buscando descobrir qual apresenta seria a mais prejudicial ambientalmente, ou seja, qual possui o maior valor de A_p entre as duas.

Tabela 3.33 – Estruturas adotadas

Estrutura 1		Estrutura 2	
Material	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**
CBUQ	10	CBUQ	10
BGS	15	BGTC (5%)	17
Solo-brita	40	Solo-brita	15
Subleito (CBR≥8%)		Subleito (CBR≥8%)	

Basta utilizar a equação (3.6) para encontrar os valores de A_p. Como exemplo são apresentados os cálculos para a Estrutura 1.

$$A_{p1} = \frac{(10x1{,}407 + 15x0{,}004 + 40x0{,}002)}{(10 + 15 + 40)} = 0{,}2188$$

De forma análoga, calcula-se o valor de A_p para a segunda estrutura.

$$A_{p2} = 0{,}3526$$

Logo, é possível concluir que a estrutura 1 possui um potencial poluidor menor em comparação com a estrutura 2.

3.2.7 Conclusões parciais da análise unitária

Verificou-se que, independente do poluente ou do item de consumo (energia ou água), para os valores iniciais, os materiais que podem ser utilizados na camada de revestimento emitem mais poluentes e geram maior consumo quando comparados aos materiais que são utilizados como base e sub-base de pavimentos. Nestes se alternam como maiores poluidores, o SMA como maior consumidor de energia e água e maior emissor de SO_2 e Hg; e o CCP como maior emissor de CO_2, NO_x, PM_{10}, CO e Pb. A constatação que estes materiais apresentaram os maiores índices poluidores, não indica que os mesmos devem ter sua utilização restrita. Materiais de revestimento, em geral, possuem características mecânicas superiores aos materiais utilizados na base e sub-base. Este fator leva a duas consequências: Primeiro se tratam de materiais de maior durabilidade e; Segundo, sua aplicação ocorre em menores espessuras em comparação aos demais materiais, fazendo com que seja relativo a questão dos valores totais de poluição.

No outro extremo está o Solo como menor poluidor, tendo as menores emissões consumo em todos os parâmetros com exceção de Hg onde a BGS foi a de menor emissão.

Comparando-se os valores dos Índices de Ecoeficiência, percebe-se que a distribuição mais uniforme se deu na emissão de NO_x onde o IE varia de 1,00 (solo) à 82,28 (CCP). A maior variação se deu nas emissões de SO_2 onde o SMA (último colocado) chega a emitir aproximadamente 12.300 vezes mais SO_2 do que o solo (primeiro colocado).

Nota-se que o cimento exerce certa função poluidora. Materiais granulares isolados ou misturados com solo, tendem a ser menos poluentes do que misturas de material granular com cimento ou cimento e solo. Dependendo do ter de cimento, misturas de solo-cimento se aproximam das emissões dos materiais de revestimento, fator expressivo dado que o solo sozinho tende a ser o material menos poluente conforme visto anteriormente.

O gráfico de impressão digital ambiental gerado ajuda na análise completa das emissões. Este gráfico, juntamente com a normalização dos Índices de Ecoeficiência, permitiram o cálculo das áreas dos polígonos de cada material, fornecendo com maior precisão um índice hierárquico de ecoeficiência dos materiais. Vale ressaltar que nesta última análise, não foram atribuídos pesos aos itens de consumo e poluentes, ou seja, todos foram tradados com o mesmo grau de importância. Caberia uma análise multidisciplinar para ajustar o gráfico de impressão digital ambiental não somente nos pesos, mas na relevância de cada item analisado podendo alterar, inclusive, a forma do gráfico e consequentemente, a ordem final dos materiais. Contudo, acredita-se que o gráfico apresentado e a equação de áreas ponderadas (Ap) configuram como ferramentas para ajuda na escolha dos materiais sob a ótica ambiental, ressaltando-se que, deve-se também analisar os fatores técnicos e econômicos para uma escolha mais assertiva do material a ser utilizado.

4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta os estudos de caso que propõem analisar e verificar a condição ambiental e econômica de diferentes configurações de pavimentos. Para tal, estruturas serão dimensionadas e os custos totais, consumo de energia e emissão de poluentes serão computados.

Após a análise unitária apresentada no capítulo anterior a qual buscava entender não só o funcionamento do programa, mas como um centímetro de cada material influenciava os resultados, propõe-se outros três tipos de análise, agora em formato de estudo de caso.

A primeira metodologia tem por objetivo estudar, para as mesmas condições de projeto, ou seja, mesmo tráfego e mesma condição de suporte do subleito, variados tipos de estrutura buscando verificar a influência na utilização de diferentes tipos de materiais em todas as camadas do pavimento.

A segunda metodologia a ser descrita, busca ser o contrário da primeira, ou seja, variar as condições de projeto, porém variando minimamente os tipos de materiais utilizados.

Por fim, a terceira metodologia propõe a execução de três matrizes diferentes de estruturas asfálticas sendo uma para pavimentos flexíveis, uma para pavimentos semirrígidos e outra para pavimentos invertidos buscando analisar a diferença na emissão de poluentes para cada uma destas.

4.1 METODOLOGIA 1: MESMAS CONDIÇÕES DE PROJETO

A metodologia 1 consiste em:

- Definição dos parâmetros de projeto (tráfego e condição de suporte do subleito);
- Definição dos materiais a serem utilizados e suas caraterísticas (módulo de resiliência e coeficiente de Poisson);
- Dimensionamento de estrutura base para reconstrução de pavimento;
- Dimensionamento de estruturas alternativas à estrutura base variando somente o material da camada de revestimento;

- Dimensionamento de estruturas alternativas à estrutura base variando somente o material da camada de base;
- Dimensionamento de estruturas alternativas à estrutura base variando somente o material da camada de sub-base;
- Análise da ecoeficiência (emissão de poluentes e consumo de energia) das soluções dimensionadas;

A estrutura base, servirá apenas como referência para o estudo de cada uma das alternativas. Busca-se, portanto, verificar a influência que cada material exerce no todo.

Todo o dimensionamento baseia-se nas recomendações do Manual de Pavimentação do DNIT (2006). Como referência complementar ao manual, utilizam-se a Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (IP-DE-P00/001 de 2006) e a Instrução de Projeto para Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento (IP-08/2004) da Prefeitura Municipal de São Paulo.

4.1.1 Características do Projeto e dos materiais

Para os estudos, adotou-se o Número N igual a $4{,}8 \times 10^7$ solicitações do eixo padrão. A capacidade de suporte do subleito representou-se pelo valor de CBR igual à 8%.

Os materiais adotados no dimensionamento assim como suas características, são apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Características dos materiais utilizados

Material	Módulo (MPa)	Coeficiente de Poisson
CBUQ Convencional	3500	0,35
BGS	300	0,40
Rachão	150	0,45
Solo-Brita	200	0,35
Subleito CBR≥8%	80	0,45

4.1.2 Soluções Possíveis

Dado o volume de situações a serem simuladas, optou-se por não incluir estruturas de pavimentos rígidos na análise, focando o estudo em estruturas de pavimentos asfálticos.

Desta forma, este estudo limitou-se a avaliar reconstruções de pavimentos flexíveis, semirrígidos e invertidos assim como estruturas com base reciclada com adição de somente brita, somente cimento ou brita e cimento.

4.1.3 Dimensionamento

Para as estruturas a serem reconstruídas, utilizou-se a metodologia de dimensionamento proposta pelo DNIT que consiste na metodologia preconizada pela USACE (*United States Corps of Engineers*).

De maneira simplificada, com o par de informações CBR e Número N, é possível determinar a espessura total do pavimento em termos de material granular com auxílio de ábaco demonstrado na Figura 4.1.

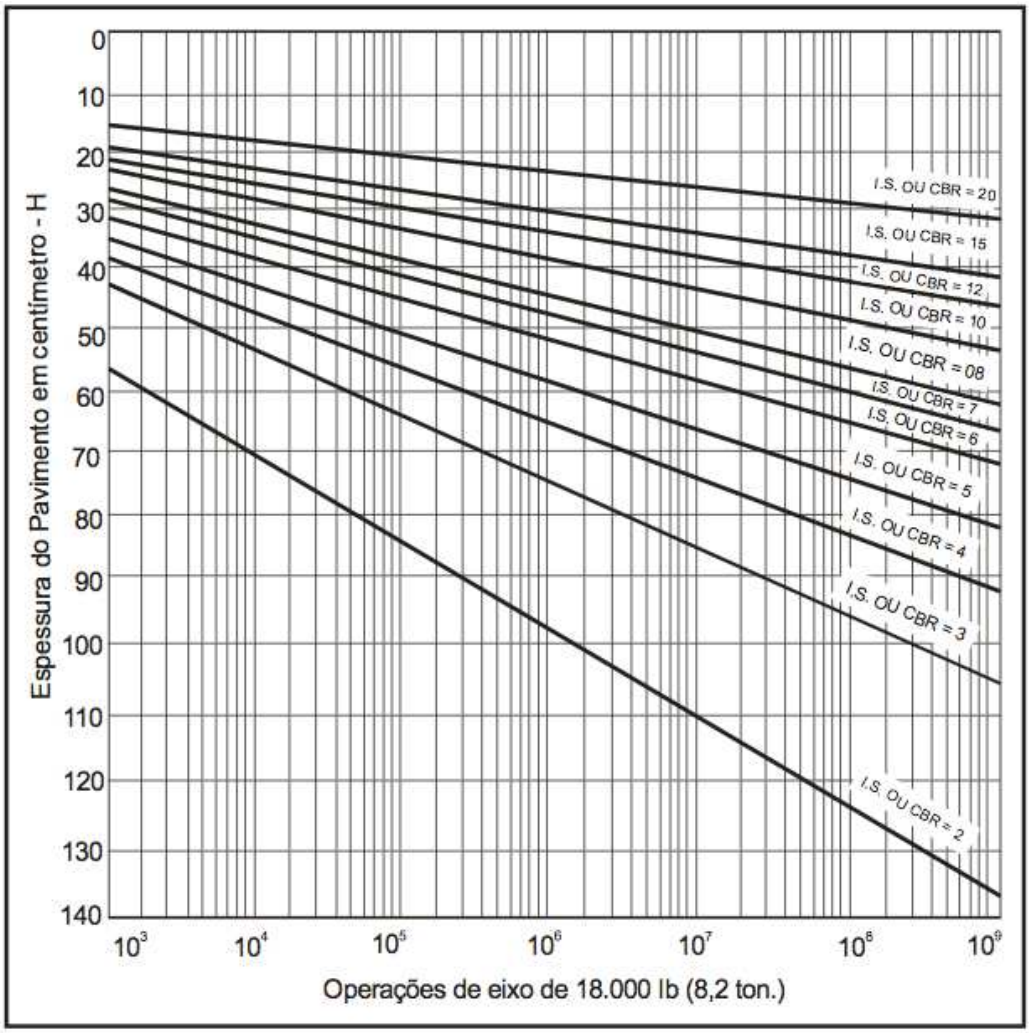


Figura 4.1 – Curvas para determinação da espessura do pavimento a partir do número de operações de projeto e CBR do pavimento (DNIT, 2006)

A equação (4.1 a seguir é apresentada no manual de pavimentação do DNIT (2006) e foi obtida por meio do ábaco apresentado na Figura 4.1. Esta equação correlaciona diretamente os parâmetros de entrada Número N e CBR como função da espessura total equivalente (H_m).

$$H_m = 77{,}67N^{0{,}0482}.CBR^{-0{,}598} \tag{4.1}$$

As exigências geotécnicas são divididas de acordo com as camadas. Para o reforço do subleito faz-se necessária características superiores a do subleito. Para sub-base granulometricamente estabilizada exige-se CBR ≥ 20% e índice do grupo IG=0 para qualquer tipo de tráfego. Para base estabilizada granulometricamente é requerido CBR ≥ 80%, limite de liquidez máximo igual a 25%, índice de plasticidade máximo igual a 6% e equivalente de areia mínimo igual a 30%.

Calculado o H_m deve-se determinar a espessura de cada camada. Para tal utilizam-se as seguintes inequações sendo que a nomenclatura das mesmas é descrita na Figura 4.2.

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \tag{4.2}$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \tag{4.3}$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{ref} \geq H_m \tag{4.4}$$

Onde:

R= Espessura do Revestimento;

B=Espessura da camada de Base;

h_{20}=Espessura da camada de Sub-base;

h_n=Espessura da camada de reforço de Subleito.

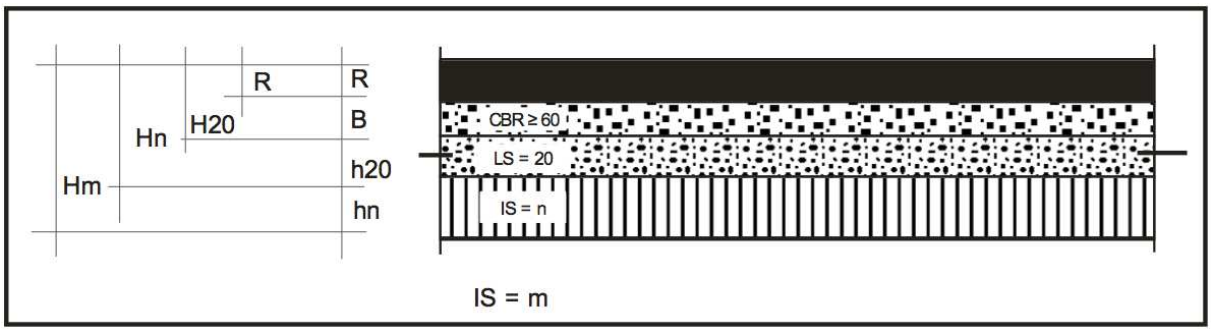


Figura 4.2 – Nomenclatura das camadas do pavimento (DNIT, 2006)

A partir da espessura total (Hm) obtida com auxílio do ábaco da Figura 4.1 é possível determinar os valores de Hn, H_{20}. A espessura do revestimento (R) é obtida com auxílio da Tabela 7.2. Subsequentemente obtêm-se os valores das espessuras de base (B), sub-base (h20) e reforço do subleito (Hn) pelo equacionamento previamente descrito.

Tabela 4.2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso (DNIT, 2006)

N	Espessura Mínima de Revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5x10^6$	Revestimentos Betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5x10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5x10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5x10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Os coeficientes de equivalência estrutural (k) sugeridos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coeficiente de equivalência estrutural (DNIT, 2006)

Componente do Pavimento	Coeficiente k
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo-cimento c/ resistência à compressão a 7 dias superior a 4,5 MPa	1,70
Idem c/ resistência à compressão a 7 dias entre 4,5 MPa e 2,8 MPa	1,40
Idem c/ resistência à compressão a 7 dias entre 2,8 MPa e 2,1 MPa	1,20

A estrutura final obtida na maioria das vezes, não representa a estrutura mais adequada fazendo-se necessária uma verificação mecanicista. A análise mecanicista é sugerida no manual de pavimentação do DNIT, porém o mesmo não indica metodologia e, tão pouco, modelos de verificação. Desta forma, recorreu-se a Instrução de Projeto de Pavimentação do DER-SP (IP-DE-P00/001) de 2006, que sugere modelos de fadiga para deformações horizontais de tração (ε_t) nas fibras

inferiores das camadas asfálticas, deformações verticais de compressão (ε_v) no topo do subleito, tensões horizontais de tração (σ_t) na fibra inferior da camada cimentada para pavimentos semirrígidos; e para os deslocamentos verticais recuperáveis no topo do revestimento asfáltico (Deflexão máxima – D_0). A análise mecanicista para as estruturas dimensionadas a serem estudas será feita com auxílio do programa ELSYM-5 (*Elastic Layered System*) que utiliza a teoria de camadas elásticas para cálculo dos parâmetros críticos das estruturas.

Sabe-se da existência dos mais variados modelos para avaliação mecanicista, porém este trabalho restringiu-se a utilização dos modelos indicados pelos órgãos brasileiros competentes buscando não fugir do escopo original de contribuir com a avaliação da ecoeficiencia de estruturas de pavimentos flexíveis aproximando a etapa de dimensionamento do estudo de caso de um projeto real. A seguir são apresentados os modelos de fadiga dos valores admissíveis em função do número N, utilizados.

- Deslocamento vertical recuperável - D_0 (DNER, 1979 apud DER/SP, 2006)

$$\log D_{adn} = 3{,}01 - 0{,}174 \times \log N \tag{4.5}$$

- Deformação de tração na fibra inferior do CBUQ - ε_t (AI, 1976 apud DER/SP, 2006)

$$N = 2{,}961 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3{,}291} \tag{4.6}$$

– Deformação de compressão no topo do subleito – ε_v (Dormon; Metcalf, 1965 apud DER/SP, 2006)

$$N = 6{,}069 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{4{,}762} \tag{4.7}$$

– Tensão de Tração na Fibra Inferior do Solo-Cimento – σ_t (DER/SP, 2006)

$$N = 10^{\left(RT - \frac{94{,}76}{-2{,}50}\right)} \tag{4.8}$$

- Tensão de Tração na Fibra Inferior da BGTC - σ_t (PMSP, 2004b)

$$N = 10^{(37{,}4231 - 38{,}4615\, RT)} \tag{4.9}$$

4.1.4 Estruturas Dimensionadas

4.1.4.1 Solução Base

Seguindo a metodologia proposta, inicialmente dimensiona-se uma estrutura base para que as demais possam ter uma referência na comparação. Fazendo uso da metodologia do DNIT mais análise mecanicista, obtém-se a estrutura base de pavimento apresentada na Tabela 4.4 baseando-se nas condições preestabelecidas de tráfego e condição de suporte do subleito.

Tabela 4.4 – Solução Base

Material	Esp. (cm)
CBUQ	10
BGS	15
Solo-brita	40
Subleito	-

O dimensionamento pela metodologia do DNIT e o resultado da análise mecanicista são apresentado na Tabela 4.5. Todas as saídas do programa ELSYM-5 são apresentadas no APÊNDICE B.

Tabela 4.5 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Base)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Solo-Brita	1,00	40,0	40,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**75,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	41,6	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,202	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,847	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

4.1.4.2 Análise da Camada de Revestimento

Para esta análise foi proposta a troca do CBUQ convencional por CBUQ com 2% de borracha em volume, em substituição do agregado. O intuito é verificar se, apesar da redução no módulo de resiliência, que ocorre com a adição da borracha, se a estrutura resultante terá emissões menores por utilizar borracha reciclada.

A estrutura é apresentada na Tabela 4.6. O dimensionamento pela metodologia do DNIT é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Solução Alternativa 1

Material	Esp. (cm)
CBUQ c/ Borracha (2%)	10
BGS	15
Solo-brita	40
Subleito	-

Tabela 4.7 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 1)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
CBUQ COM BORRACHA (2% EM PESO)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Solo-Brita	1,00	40,0	40,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**75,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	43,55	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,560	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	2,652	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Apesar da redução do módulo de resiliência do revestimento, a espessura da camada não teve de ser alterada.

4.1.4.3 Análise da Camada de Base

Nesta análise, propõe-se a troca da BGS primeiro por Solo-Brita buscando avaliar a influência da adição de solo na referida camada tendo em vista que este material apresentou o melhor desempenho na análise unitária de consumos e emissões. Posteriormente outras duas opções de materiais de base são testadas: Solo-Brita Cimento e BGTC. Estes buscam analisar a influência do enrijecimento da camada de base com teores diferentes de cimento.

Tabela 4.8 – Soluções Alternativas 2, 3 e 4

Solução Alternativa 2		Solução Alternativa 3		Solução Alternativa 4	
Material	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**
CBUQ	10	CBUQ	10	CBUQ	10
Solo-brita	20	Solo-brita Cimento	15	BGTC	17
Solo-brita	40	Solo-brita	15	Solo-brita	15
Subleito	-	Subleito	-	Subleito	-

Tabela 4.9 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 2)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
CBUQ COM BORRACHA (2% EM PESO)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	20,0	20,0
Solo-Brita	1,00	40,0	40,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**80,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	44,03	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,592	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	2,402	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.10 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 3)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
Solo-Brita-cimento	1,40	15,0	21,0
Solo-Brita	1,00	15,0	15,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**56,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	29,13	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_v (10^{-4}cm/cm)	2,304	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	5,410	7,554	(4.8)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.11 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 4)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
BGTC	1,70	17,0	28,9
Solo-Brita	1,00	15,0	15,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**63,9**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	25,21	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_v (10^{-4}cm/cm)	0,752	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	6,150	7,554	(4.8)	FADIGA CAMADA CIM.

Nesta etapa verificou-se que houve aumento na espessura na solução com Solo-Brita como base em função do módulo de resiliência inferior. Na utilização de Solo-Brita Cimento e BGTC os materiais ficaram limitados a sua espessura mínima de execução, pois pela análise mecanicista a estrutura ainda estaria adequada com espessuras menores de base.

4.1.4.4 Análise da Camada de Sub-Base

Para a sub-base a primeira proposta é de substituir o solo-cimento por camada inteiramente granular de rachão. Posteriormente optou-se novamente pela utilização de Solo-Brita Cimento e BGTC. A Tabela 4.12 resume as estruturas dimensionadas.

Tabela 4.12 – Soluções Alternativas 5, 6 e 7

Solução Alternativa 5		Solução Alternativa 6		Solução Alternativa 7	
Material	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**
CBUQ	10	CBUQ	10	CBUQ	10
BGS	15	BGS	15	BGS	15
Rachão	45	Solo-brita Cimento	15	BGTC	17
Subleito	-	Subleito	-	Subleito	-

Tabela 4.13 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 5)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	45,0	45,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**80,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	44,77	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,307	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	2,423	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.14 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 6)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Solo-Brita Cimento	1,40	15,0	21,0
Espessura total (maior ou igual a H8)			**56,0**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	32,42	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,765	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,930	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	4,910	7,554	(4.8)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.15 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução Alternativa 7)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
BGTC	1,70	17,0	28,9
Espessura total (maior ou igual a H8)			**63,9**
Subleito (CBR $\geq$ 8%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	29,45	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,714	2,905	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,394	2,817	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	5,730	7,554	(4.8)	FADIGA CAMADA CIM.

Novamente o Solo-Brita Cimento e a BGTC tiveram suas espessuras limitadas pelas espessuras executivas. O rachão teve aumento de espessura em relação à utilização de Solo-Brita.

4.1.5 Cálculo do SN

Segundo a AASHTO (1993), o SN é função das espessuras das camadas, dos coeficientes das camadas e dos coeficientes de drenagem das camadas de base e sub-base, como indicado na equação (4.10 a seguir:

$$\mathrm{SN} = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \tag{4.10}$$

Os valores dos coeficientes das camadas ($a_1, a_2\ e\ a_3$) em geral são obtidos com base no módulo de elasticidade (E), porém correlações com outros ensaios tais como o

CBR são fornecidas para o cálculo deste coeficiente. Os ábacos utilizados para obtenção de tais coeficientes são apresentados no ANEXO A. Os mesmos foram retirados do manual para dimensionamento de pavimentos da AASHTO (1993).

Desta forma foi possível o cálculo de SN das estruturas dimensionadas. Na Tabela 4.16 são apresentados os valores de SN calculados.

Tabela 4.16 – Cálculo do SN

Solução	Material	Esp. (cm)	Módulo (kgf/cm²)	ai	Esp. (in)	SN
Base	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	3,98
	BGS	15	3000	0,14	5,91	
	Solo-brita	40	2000	0,09	15,75	
1	CBUQ c/ Borracha	10	23000	0,44	3,94	3,79
	BGS	15	3000	0,14	5,91	
	Solo-brita	40	2000	0,09	15,75	
2	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	4,25
	Solo-brita	20	2000	0,14	7,87	
	Solo-brita	40	2000	0,09	15,75	
3	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	3,27
	Solo-brita Cimento	15	45000	0,17	5,91	
	Solo-brita	15	2000	0,09	5,91	
4	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	4,14
	BGTC	17	75000	0,28	6,69	
	Solo-brita	15	2000	0,09	5,91	
5	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	4,15
	BGS	15	3000	0,14	5,91	
	Rachão	45	1500	0,09	17,72	
6	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	3,56
	BGS	15	3000	0,14	5,91	
	Solo-brita Cimento	15	45000	0,17	5,91	
7	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	4,43
	BGS	15	3000	0,14	5,91	
	BGTC	17	75000	0,28	6,69	

4.1.6 Análise de Emissão de Poluentes e Consumo de Energia

Nesta etapa, as estruturas previamente dimensionadas são inseridas no PaLATE onde será avaliada a ecoeficiência de cada uma. Os volumes dos materiais de cada solução dimensionada estão apresentados no APÊNDICE C.

4.1.6.1 Análise da troca de revestimento

As tabelas a seguir resumem os dados da análise de consumos e emissões.

Tabela 4.17 – Consumo de Energia (Revestimento)

Solução	Energia [MJ]	Coeficiente
Base	1.588.878,97	1,00
Alternativa 1	1.644.295,19	1,03

Tabela 4.18 – Consumo de Água (Revestimento)

Solução	Consumo de Água [kg]	Coeficiente
Base	458,32	1,00
Alternativa 1	477,66	1,04

Tabela 4.19 – Emissão de CO_2 (Revestimento)

Solução	CO_2 [kg]	Coeficiente
Base	91.894,21	1,00
Alternativa 1	99.515,07	1,08

Tabela 4.20 – Emissão de NO_X (Revestimento)

Solução	NO_x [g]	Coeficiente
Base	503.871,69	1,00
Alternativa 1	533.561,95	1,06

Tabela 4.21 – Emissão de PM_{10} (Revestimento)

Solução	PM_{10} [g]	Coeficiente
Alternativa 1	583.237,98	0,99
Base	588.270,33	1,00

Tabela 4.22 – Emissão de SO_2 (Revestimento)

Solução	SO_2 [g]	Coeficiente
Base	9.852.398,20	1,00
Alternativa 1	9.896.351,22	1,00

Tabela 4.23 – Emissão de CO (Revestimento)

Solução	CO [g]	Coeficiente
Base	275.355,59	1,00
Alternativa 1	287.698,01	1,04

Tabela 4.24 – Emissão de Hg (Revestimento)

Solução	Hg [g]	Coeficiente
Base	1,64	1,00
Alternativa 1	1,72	1,05

Tabela 4.25 – Emissão de Pb (Revestimento)

Solução	Pb [g]	Coeficiente
Base	86,93	1,00
Alternativa 1	91,57	1,05

Pode-se observar que a substituição de 2% em volume do agregado componente do CBUQ por borracha em geral, aumentou os consumos e emissões. A única exceção se deu na emissão de materiais particulados, onde a alternativa base com CBUQ convencional é 1,06 mais poluente do que o CBUQ com borracha.

4.1.6.2 Análise da troca da base

Tabela 4.26 – Consumo de Energia (Base)

Solução	Energia [MJ]	Coeficiente
Alternativa 3	1.543.003,08	0,97
Alternativa 2	1.571.780,51	0,99
Base	1.588.878,97	1,00
Alternativa 4	1.628.619,38	1,03

Tabela 4.27 – Consumo de Água (Base)

Solução	Consumo de Água [kg]	Coeficiente
Alternativa 2	455,70	0,99
Base	458,32	1,00
Alternativa 3	511,19	1,12
Alternativa 4	532,02	1,16

Tabela 4.28 – Emissão de CO_2 (Base)

Solução	CO_2 [kg]	Coeficiente
Alternativa 3	88.503,64	0,96
Alternativa 2	90.699,66	0,99
Base	91.894,21	1,00
Alternativa 4	94.546,98	1,03

Tabela 4.29 – Emissão de NO_X (Base)

Solução	NO_x [g]	Coeficiente
Base	503.871,69	1,00
Alternativa 2	506.909,51	1,01
Alternativa 3	601.828,70	1,19
Alternativa 4	629.772,38	1,25

Tabela 4.30 – Emissão de PM_{10} (Base)

Solução	PM_{10} [g]	Coeficiente
Alternativa 3	406.386,74	0,69
Alternativa 4	473.602,18	0,81
Alternativa 2	567.317,47	0,96
Base	588.270,33	1,00

Tabela 4.31 – Emissão de SO_2 (Base)

Solução	SO_2 [g]	Coeficiente
Alternativa 2	9.851.339,18	1,00
Base	9.852.398,20	1,00
Alternativa 3	9.985.982,42	1,01
Alternativa 4	10.012.031,86	1,02

Tabela 4.32 – Emissão de CO (Base)

Solução	CO [g]	Coeficiente
Alternativa 2	274.699,76	1,00
Base	275.355,59	1,00
Alternativa 3	303.357,04	1,10
Alternativa 4	316.151,83	1,15

Tabela 4.33 – Emissão de Hg (Base)

Solução	Hg [g]	Coeficiente
Base	1,64	1,00
Alternativa 2	1,64	1,00
Alternativa 3	1,77	1,08
Alternativa 4	1,80	1,10

Tabela 4.34 – Emissão de Pb (Base)

Solução	Pb [g]	Coeficiente
Alternativa 2	86,63	1,00
Base	86,93	1,00
Alternativa 3	96,06	1,11
Alternativa 4	99,29	1,14

Ao analisar somente a mudança da camada de base pode-se observar certa divisão entre os menos poluidores. As soluções alternativas 2 e 3 se alternam sendo as melhores em quatro itens cada uma. A solução base fica com dois outros itens. A solução alternativa 4 é a mais poluente em oito dos dez quesitos sugerindo que o teor de cimento aliado a uma espessura um pouco mais alta tende a ser a mais prejudicial ao meio ambiente corroborando o visto na análise unitária.

O poluente que obteve a maior variação entre as alternativas, foi o material particulado (PM_{10}). Neste, a solução base emitiu 45% mais volume de material particulado do que

a solução alternativa 3 indicando que uma base estritamente granular como a da solução base (composta de BGS) emite mais materiais particulados do que as demais soluções, as quais os materiais são compostos.

Na emissão de NO_X observou-se a segunda maior diferença onde a solução alternativa 4 (BGTC) emitiu cerca de 25% mais NO_X do que a solução base. Neste poluente, conforme visto em análise unitária, o teor de cimento tem grande influência visto que a solução alternativa 3 (Solo-Brita Cimento) emitiu19% mais do que a base ficando longe do 1% emitido a mais pela solução alternativa 2 (Solo-Brita).

4.1.6.3 Análise da troca da sub-base

Tabela 4.35 – Consumo de Energia (Sub-base)

Solução	Energia [MJ]	Coeficiente
Base	1.588.878,97	1,00
Alternativa 6	1.595.477,78	1,00
Alternativa 7	1.869.343,91	1,18
Alternativa 5	1.982.595,01	1,25

Tabela 4.36 – Consumo de Água (Sub-base)

Solução	Consumo de Água [kg]	Coeficiente
Base	458,32	1,00
Alternativa 5	513,94	1,12
Alternativa 6	518,57	1,13
Alternativa 7	633,77	1,38

Tabela 4.37 – Emissão de CO_2 (Sub-base)

Solução	CO_2 [kg]	Coeficiente
Base	91.894,21	1,00
Alternativa 6	92.224,21	1,00
Alternativa 7	111.466,64	1,21
Alternativa 5	119.787,34	1,30

Tabela 4.38 – Emissão de NO_X (Sub-base)

Solução	NO_x [g]	Coeficiente
Base	503.871,69	1,00
Alternativa 5	563.959,91	1,12
Alternativa 6	610.832,28	1,21
Alternativa 7	795.753,32	1,58

Tabela 4.39 – Emissão de PM_{10} (Sub-base)

Solução	PM_{10} [g]	Coeficiente
Alternativa 6	458.984,62	0,78
Alternativa 7	555.784,51	0,94
Base	588.270,33	1,00
Alternativa 5	985.780,34	1,68

Tabela 4.40 – Emissão de SO_2 (Sub-base)

Solução	SO_2 [g]	Coeficiente
Base	9.852.398,20	1,00
Alternativa 5	9.879.890,04	1,00
Alternativa 6	9.989.670,32	1,01
Alternativa 7	10.185.924,27	1,03

Tabela 4.41 – Emissão de CO (Sub-base)

Solução	CO [g]	Coeficiente
Base	275.355,59	1,00
Alternativa 6	308.513,71	1,12
Alternativa 5	312.765,18	1,14
Alternativa 7	377.658,57	1,37

Tabela 4.42 – Emissão de Hg (Sub-base)

Solução	Hg [g]	Coeficiente
Base	1,64	1,00
Alternativa 5	1,64	1,00
Alternativa 6	1,78	1,08
Alternativa 7	1,96	1,20

Tabela 4.43 – Emissão de Pb (Sub-base)

Solução	Pb [g]	Coeficiente
Base	86,93	1,00
Alternativa 5	95,01	1,09
Alternativa 6	97,15	1,12
Alternativa 7	115,87	1,33

Para o estudo da camada de sub-base, verificou-se que a solução base aparece como a mais ecoeficiente em sete parâmetros dos dez analisados. A mais poluente fica novamente com a alternativa que utiliza a BGTC (alternativa 7).

Semelhante ao estudo da camada de Base, a maior diferença se deu no material particulado, onde a solução alternativa 5 (Rachão) emite 2,15 vezes mais que a solução alternativa 6. Camadas puramente granulares emitem maiores concentrações de material particulado.

A segunda maior diferença ficou na emissão de NO_X onde a solução alternativa 7 teve emissões 58% maiores que as da solução base.

4.1.6.4 Análise da geral das estruturas

Tabela 4.44 – Consumo de Energia (Geral)

Solução	Energia [MJ]	Coeficiente
Alternativa 3	1.543.003,08	0,97
Alternativa 2	1.571.780,51	0,99
Base	1.588.878,97	1,00
Alternativa 6	1.595.477,78	1,00
Alternativa 4	1.628.619,38	1,03
Alternativa 1	1.644.295,19	1,03
Alternativa 7	1.869.343,91	1,18
Alternativa 5	1.982.595,01	1,25

Tabela 4.45 – Consumo de Água (Geral)

Solução	Consumo de Água [kg]	Coeficiente
Alternativa 2	455,70	0,99
Base	458,32	1,00
Alternativa 1	477,66	1,04
Alternativa 3	511,19	1,12
Alternativa 5	513,94	1,12
Alternativa 6	518,57	1,13
Alternativa 4	532,02	1,16
Alternativa 7	633,77	1,38

Tabela 4.46 – Emissão de CO_2 (Geral)

Solução	CO_2 [kg]	Coeficiente
Alternativa 3	88.503,64	0,96
Alternativa 2	90.699,66	0,99
Base	91.894,21	1,00
Alternativa 6	92.224,21	1,00
Alternativa 4	94.546,98	1,03
Alternativa 1	99.515,07	1,08
Alternativa 7	111.466,64	1,21
Alternativa 5	119.787,34	1,30

Tabela 4.47 – Emissão de NO_X (Geral)

Solução	NO_x [g]	Coeficiente
Base	503.871,69	1,00
Alternativa 2	506.909,51	1,01
Alternativa 1	533.561,95	1,06
Alternativa 5	563.959,91	1,12
Alternativa 3	601.828,70	1,19
Alternativa 6	610.832,28	1,21
Alternativa 4	629.772,38	1,25
Alternativa 7	795.753,32	1,58

Tabela 4.48 – Emissão de PM_{10} (Geral)

Solução	PM_{10} [g]	Coeficiente
Alternativa 3	406.386,74	0,69
Alternativa 6	458.984,62	0,78
Alternativa 4	473.602,18	0,81
Alternativa 7	555.784,51	0,94
Alternativa 2	567.317,47	0,96
Alternativa 1	583.237,98	0,99
Base	588.270,33	1,00
Alternativa 5	985.780,34	1,68

Tabela 4.49 – Emissão de SO_2 (Geral)

Solução	SO_2 [g]	Coeficiente
Alternativa 2	9.851.339,18	1,00
Base	9.852.398,20	1,00
Alternativa 5	9.879.890,04	1,00
Alternativa 1	9.896.351,22	1,00
Alternativa 3	9.985.982,42	1,01
Alternativa 6	9.989.670,32	1,01
Alternativa 4	10.012.031,86	1,02
Alternativa 7	10.185.924,27	1,03

Tabela 4.50 – Emissão de CO (Geral)

Solução	CO [g]	Coeficiente
Alternativa 2	274.699,76	1,00
Base	275.355,59	1,00
Alternativa 1	287.698,01	1,04
Alternativa 3	303.357,04	1,10
Alternativa 6	308.513,71	1,12
Alternativa 5	312.765,18	1,14
Alternativa 4	316.151,83	1,15
Alternativa 7	377.658,57	1,37

Tabela 4.51 – Emissão de Hg (Geral)

Solução	Hg [g]	Coeficiente
Base	1,64	1,00
Alternativa 5	1,64	1,00
Alternativa 2	1,64	1,00
Alternativa 1	1,72	1,05
Alternativa 3	1,77	1,08
Alternativa 6	1,78	1,08
Alternativa 4	1,80	1,10
Alternativa 7	1,96	1,20

Tabela 4.52 – Emissão de Pb (Geral)

Solução	Pb [g]	Coeficiente
Alternativa 2	86,63	1,00
Base	86,93	1,00
Alternativa 1	91,57	1,05
Alternativa 5	95,01	1,09
Alternativa 3	96,06	1,11
Alternativa 6	97,15	1,12
Alternativa 4	99,29	1,14
Alternativa 7	115,87	1,33

Na análise geral constatou-se que, assim como na análise da camada de base, as soluções menos poluentes são as alternativas 2 e 3 sendo as mais ecoeficientes em 4 parâmetros cada uma delas.

Entre as mais poluentes, a alternativa 7 (com BGTC na sub-base) ficou como a mais poluente em seis parâmetros dos dez analisados.

4.1.7 Resultados Parciais

Após as análises individuais por camada e a análise geral das estruturas, verificou-se que não há unanimidade quando se trata de materiais menos poluentes no dimensionamento dada a variedade de poluentes e itens de consumos analisados aliados às diferentes necessidades estruturais do dimensionamento onde em alguns casos materiais menos poluentes necessitam de maiores espessuras dadas as suas características físicas compensando as menores espessuras de materiais mais poluentes, porém de módulo de resiliência mais elevado.

Por outro lado, verificou-se certos padrões em alguns poluentes como o material particulado (PM_{10}) e Óxidos de Nitrogênio (NO_X). Constatou-se que materiais estritamente granulares emitem mais PM_{10} do que outros materiais ao passo que materiais com maior teor de cimento Portland tendem a emitir mais NO_X.

4.2 METODOLOGIA 2: DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROJETO

A metodologia 2 consiste em:

- Definição da matriz dos parâmetros de projeto (tráfego e condição de suporte do subleito);
- Definição dos materiais a serem utilizados e suas caraterísticas (módulo de resiliência e coeficiente de Poisson);
- Dimensionamento das estruturas, buscando não variar muito os tipos de materiais utilizados;
- Análise da ecoeficiência (emissão de poluentes e consumo de energia) das soluções dimensionadas;

O dimensionamento das estruturas utilizará a mesma metodologia descrita no estudo de caso anterior.

4.2.1 Características do Projeto e dos Materiais

Conforme descrito anteriormente, nesta metodologia de estudo de caso busca-se variar as condições de projeto. Para as definições do volume de tráfego a ser considerado, utilizou-se como base a IP-02/2004 Classificação das Vias da Prefeitura Municipal de São Paulo onde o tráfego é classificado qualitativamente e para cada classificação, a instrução de projeto atribui um número N característico. Desta forma foram definidos cinco diferentes tipos de tráfego para o dimensionamento das estruturas deste estudo de caso. Os tipos de tráfego são apresentados na Tabela 4.53.

Tabela 4.53 – Tipos de Tráfego Adotados

Classificações de tráfego	N característico	Tipo
Leve	1,00E+05	N1
Médio	5,00E+05	N2
Meio Pesado	2,00E+06	N3
Pesado	2,00E+07	N4
Muito Pesado	5,00E+07	N5

Para a condição de suporte de subleito, optou-se por adotar valores de CBR entre as faixas definidas pelo Procedimento DNER-PRO 269/94. Desta forma adotaram-se

valores de CBR iguais a 4% (Entre 2% e 5%), 7% (entre 6% e 9%) e 10% (maior ou igual a 10%). A Tabela 4.54 apresenta os valores adotados.

Tabela 4.54 – Condição de Suporte do Subleito

Condição de Suporte	CBR (%)	Tipo
Ruim	4%	CS1
Boa	7%	CS2
Ótima	10%	CS3

Os materiais adotados no dimensionamento assim como suas características, são apresentados na Tabela 4.55

Tabela 4.55 – Características dos Materiais Utilizados

Material	Módulo Adotado (MPa)	Coeficiente de Poisson
CBUQ Convencional	3500	0,35
BGS	300	0,40
Rachão	150	0,45
BGTC	7500	0,25
Subleito CBR≥4%	40	0,45
Subleito CBR≥7%	70	0,45
Subleito CBR≥10%	100	0,45

Com base nestes valores adotados pode-se definir assim a matriz de soluções para este estudo de caso. Esta matriz é apresentada na Tabela 4.56.

Tabela 4.56 – Matriz de Soluções

	N1	N2	N3	N4	N5
CS1	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
CS2	Solução 6	Solução 7	Solução 8	Solução 9	Solução 10
CS3	Solução 11	Solução 12	Solução 13	Solução 14	Solução 15

4.2.2 Dimensionamento

Para o dimensionamento buscou-se alterar o mínimo possível a variedade dos materiais utilizados. Buscou-se manter a infraestrutura, sempre que possível, granular, porém para as soluções 4, 5, 9 e 10, devido ao elevado tráfego necessitou-se da inclusão de camada com material modificado com cimento Portland.

A seguir são apresentadas as estruturas dimensionadas para cada solução da matriz.

Tabela 4.57 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 1)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	4,0	8,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	30,0	30,0
Espessura total (maior ou igual a H4)			**53,0**
Subleito (CBR $\geq$ 4%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	82	135	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,141	19,072	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	6,772	10,340	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.58 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 2)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	4,0	8,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	20,0	20,0
Rachão	1,00	40,0	40,0
Espessura total (maior ou igual a H4)			**68,0**
Subleito (CBR $\geq$ 4%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	72,1	102	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,055	11,695	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	4,329	7,375	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.59 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 3)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	7,5	15,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	20,0	20,0
Rachão	1,00	40,0	40,0
Espessura total (maior ou igual a H4)			**75,0**
Subleito (CBR $\geq$ 4%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	70,39	80	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,345	7,675	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	4,138	5,512	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.60 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 4)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
BGS	1,00	15,0	15,0
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	1,70	16,0	27,2
Rachão	1,00	30,0	30,0
Espessura total (maior ou igual a H4)			**92,2**
Subleito (CBR $\geq$ 4%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	42,81	53	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,678	3,812	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,769	3,399	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	4,730	5,017	(4.9)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.61 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 5)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	12,5	25,0
BGS	1,00	15,0	15,0
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	1,70	17,0	28,9
Rachão	1,00	30,0	30,0
Espessura total (maior ou igual a H4)			**98,9**
Subleito (CBR $\geq$ 4%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	42,01	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,671	2,886	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,674	2,804	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	4,730	4,814	(4.9)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.62 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 6)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	4,0	8,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	20,0	20,0
Espessura total (maior ou igual a H7)			**43,9**
Subleito (CBR $\geq$ 7%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	66,52	135	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,216	19,072	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	6,971	10,340	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.63 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 7)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	4,0	8,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	18,0	18,0
Rachão	1,00	30,0	30,0
Espessura total (maior ou igual a H7)			**56,0**
Subleito (CBR $\geq$ 7%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	60,51	102	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,137	11,695	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	4,634	7,375	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.64 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 8)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	7,5	15,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	30,0	30,0
Espessura total (maior ou igual a H7)			**60,0**
Subleito (CBR $\geq$ 7%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	55,38	80	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,563	7,675	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	4,230	5,512	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.65 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 9)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
BGS	1,00	15,0	15,0
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	1,70	15,0	25,5
Rachão	1,00	25,0	25,0
Espessura total (maior ou igual a H7)			**85,5**
Subleito (CBR $\geq$ 7%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	32,66	53	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,707	3,812	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,546	3,399	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	4,900	5,017	(4.9)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.66 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 10)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
BGS	1,00	15,0	15,0
Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	1,70	15,0	25,5
Rachão	1,00	25,0	25,0
Espessura total (maior ou igual a H7)			**87,5**
Subleito (CBR $\geq$ 7%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	30,39	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,403	2,886	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	1,483	2,804	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO
σ_t (kgf/cm2)	4,690	4,814	(4.9)	FADIGA CAMADA CIM.

Tabela 4.67 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 11)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	4,0	8,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	20,0	20,0
Espessura total (maior ou igual a H10)			**43,0**
Subleito (CBR $\geq$ 10%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	66,52	135	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,216	19,072	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	6,971	10,340	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.68 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 12)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	5,0	10,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	20,0	20,0
Espessura total (maior ou igual a H10)			**45,0**
Subleito (CBR $\geq$ 10%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	54,02	102	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,538	11,695	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	5,309	7,375	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.69 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 13)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	7,5	15,0
Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	20,0	20,0
Espessura total (maior ou igual a H10)			**50,0**
Subleito (CBR $\geq$ 10%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	48,59	80	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,579	7,675	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	4,505	5,512	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.70 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 14)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	10,0	20,0
BGS	1,00	15,0	15,0
Rachão	1,00	25,0	25,0
Espessura total (maior ou igual a H10)			**60,0**
Subleito (CBR $\geq$ 10%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	42,31	53	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	2,271	3,812	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	3,269	3,399	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

Tabela 4.71 – Resumo do Dimensionamento pelo DNIT e Análise Mecanicista (Solução 15)

Camada	Coeficiente Estrutural (k)	Espessura Física (cm)	Espessura Equivalente (cm)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	12,5	25,0
BGS	1,00	12,0	12,0
Rachão	1,00	25,0	25,0
Espessura total (maior ou igual a H10)			**62,0**
Subleito (CBR $\geq$ 10%)	-	-	-

Deslocamentos e Deformações	Solicitante	Admissível	Equação	Parâmetro
D_0 (10^{-2}mm)	37,89	45	(4.5)	DEFLEXÃO
ε_t (10^{-4}cm/cm)	1,955	2,886	(4.6)	FADIGA CBUQ
ε_v (10^{-4}cm/cm)	2,794	2,804	(4.7)	RUPTURA SUBLEITO

A Tabela 4.72 resume as soluções dimensionadas onde as células em cinza claro representam as estruturas com uma camada modificada por cimento Portland e as demais representam estruturas com infraestrutura completamente granular.

Tabela 4.72 – Resumo da Soluções 1 à 15 (Espessuras em cm)

CBUQ	4,0	CBUQ	4,0	CBUQ	7,5	CBUQ	10,0	CBUQ	12,5
BGS	15,0	BGS	20,0	BGS	20,0	BGS	15,0	BGS	15,0
Rachão	30,0	Rachão	40,0	Rachão	40,0	BGTC	16,0	BGTC	17,0
CBR > 4%	-	CBR > 4%	-	CBR > 4%	-	Rachão	30,0	Rachão	30,0
						CBR > 4%	-	CBR > 4%	-
CBUQ	4,0	CBUQ	4,0	CBUQ	7,5	CBUQ	10,0	CBUQ	12,5
BGS	15,0	BGS	18,0	BGS	15,0	BGS	15,0	BGS	12,0
Rachão	20,0	Rachão	30,0	Rachão	30,0	BGTC	15,0	BGTC	15,0
CBR > 7%	-	CBR > 7%	-	CBR > 7%	-	Rachão	25,0	Rachão	25,0
						CBR > 7%	-	CBR > 7%	-
CBUQ	4,0	CBUQ	5,0	CBUQ	7,5	CBUQ	10,0	CBUQ	12,5
BGS	15,0	BGS	15,0	BGS	15,0	BGS	15,0	BGS	12,0
Rachão	20,0	Rachão	20,0	Rachão	20,0	Rachão	25,0	Rachão	25,0
CBR > 10%	-	CBR > 10%	-	CBR > 10%	-	CBR > 10%	-	CBR > 10%	-

4.2.3 Cálculo do SN

O cálculo do número estrutural das estruturas recém dimensionadas foi feito considerando os mesmos parâmetros anteriormente apresentados. A Tabela 4.73 apresenta os valores de SN e SNC calculados.

Tabela 4.73 – Cálculo do SN

Solução	Material	Esp. (cm)	Módulo (kgf/cm²)	ai	Esp. (in)	SN	SNC
S1	CBUQ	4	35000	0,44	1,57	2,58	2,96
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	30	1500	0,09	11,81		
	CBR > 4%	-	400	-	-		
S2	CBUQ	4	35000	0,44	1,57	3,21	3,59
	BGS	20	3000	0,14	7,87		
	Rachão	40	1500	0,09	15,75		
	CBR > 4%	-	400	-	-		
S3	CBUQ	7,5	35000	0,44	2,95	3,82	4,20
	BGS	20	3000	0,14	7,87		
	Rachão	40	1500	0,09	15,75		
	CBR > 4%	-	400	-	-		
S4	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	5,39	5,77
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	BGTC	16	75000	0,28	6,30		
	Rachão	30	1500	0,09	11,81		
	CBR > 4%	-	400	-	-		
S5	CBUQ	12,5	35000	0,44	4,92	5,93	6,31
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	BGTC	17	75000	0,28	6,69		
	Rachão	30	1500	0,09	11,81		
	CBR > 4%	-	400	-	-		
S6	CBUQ	4	35000	0,44	1,57	2,23	3,17
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	20	1500	0,09	7,87		
	CBR > 7%	-	700	-	-		
S7	CBUQ	4	35000	0,44	1,57	2,75	3,69
	BGS	18	3000	0,14	7,09		
	Rachão	30	1500	0,09	11,81		
	CBR > 7%	-	700	-	-		
S8	CBUQ	7,5	35000	0,44	2,95	3,19	4,13
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	30	1500	0,09	11,81		
	CBR > 7%	-	700	-	-		
S9	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	5,10	6,04
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	BGTC	15	75000	0,28	5,91		
	Rachão	25	1500	0,09	9,84		
	CBR > 7%	-	700	-	-		

Solução	Material	Esp. (cm)	Módulo (kgf/cm²)	ai	Esp. (in)	SN	SNC
S10	CBUQ	12,5	35000	0,44	4,92	5,37	6,30
	BGS	12	3000	0,14	4,72		
	BGTC	15	75000	0,28	5,91		
	Rachão	25	1500	0,09	9,84		
	CBR > 7%	-	700	-	-		
S11	CBUQ	4	35000	0,44	1,57	2,23	3,47
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	20	1500	0,09	7,87		
	CBR > 10%	-	1000	-	-		
S12	CBUQ	5	35000	0,44	1,97	2,40	3,64
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	20	1500	0,09	7,87		
	CBR > 10%	-	1000	-	-		
S13	CBUQ	7,5	35000	0,44	2,95	2,83	4,07
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	20	1500	0,09	7,87		
	CBR > 10%	-	1000	-	-		
S14	CBUQ	10	35000	0,44	3,94	3,44	4,68
	BGS	15	3000	0,14	5,91		
	Rachão	25	1500	0,09	9,84		
	CBR > 10%	-	1000	-	-		
S15	CBUQ	12,5	35000	0,44	4,92	3,71	4,95
	BGS	12	3000	0,14	4,72		
	Rachão	25	1500	0,09	9,84		
	CBR > 10%	-	1000	-	-		

4.2.4 Análise de Emissão de Poluentes e Consumo de Energia

Novamente utilizando o programa PaLATE, é possível computar as emissões e consumos das estruturas dimensionadas. A Tabela 4.74 resume os dados encontrados com o programa PaLATE considerando mais uma vez, os resultados obtidos para uma faixa de 3,50 metros de largura por um quilometro de via.

Tabela 4.74 – Emissões e Consumos – Metodologia 2 (Resultados por faixa, por km)

Solução	Energia [MJ]	Água [kg]	CO2 [kg]	NOx [g]	PM10 [g]	SO2 [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]
1	1.095.036	258,89	68.759	286.606	657.084	4.006.981	160.901	0,733	46,739
2	1.289.322	286,12	82.541	322.361	849.597	4.020.693	180.409	0,737	50,786
3	1.673.892	414,53	102.949	458.810	915.133	7.433.215	254.775	1,253	75,793
4	2.260.454	677,09	139.421	851.061	973.635	10.176.577	410.698	1,927	121,874
5	2.576.230	785,33	156.766	972.159	1.034.109	12.626.336	473.816	2,332	142,572
6	949.776	238,53	58.454	259.873	513.320	3.996.729	146.316	0,729	43,713
7	1.124.451	263,02	70.845	292.019	686.334	4.009.057	163.855	0,733	47,352
8	1.479.606	387,30	89.167	423.055	722.619	7.419.502	235.268	1,248	71,746
9	2.156.035	654,48	132.030	816.984	888.992	10.150.735	395.727	1,906	118,333

Solução	Energia [MJ]	Água [kg]	CO2 [kg]	NOx [g]	PM10 [g]	SO2 [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]
10	2.410.606	746,15	145.050	911.957	907.455	12.577.702	448.214	2,291	136,390
11	949.776	238,53	58.454	259.873	513.320	3.996.729	146.316	0,729	43,713
12	1.064.940	277,52	64.585	300.529	532.522	4.968.803	168.873	0,886	51,313
13	1.334.346	366,94	78.862	396.322	578.856	7.409.250	220.683	1,245	68,720
14	1.679.193	467,91	98.457	506.315	697.575	9.839.998	280.557	1,611	87,912
15	1.933.765	559,58	111.477	601.288	716.038	12.266.965	333.044	1,997	105,969

Diferentemente das análises anteriores, optou-se por comparar os resultados encontrados por meio de gráficos a fim de facilitar a visualização do comportamento dos consumos e emissões.

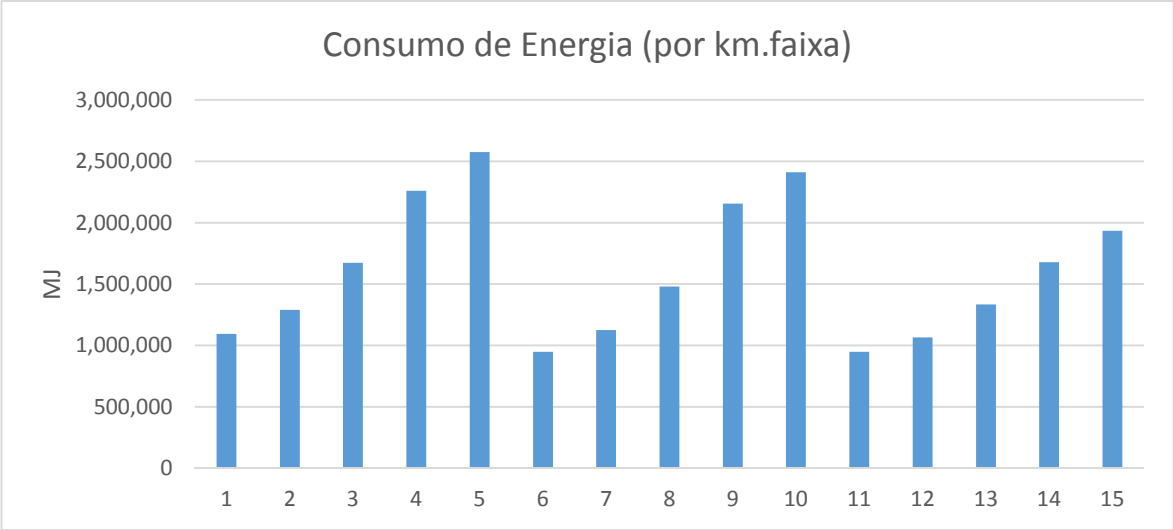


Figura 4.3 – Consumo de Energia (Metodologia 2)

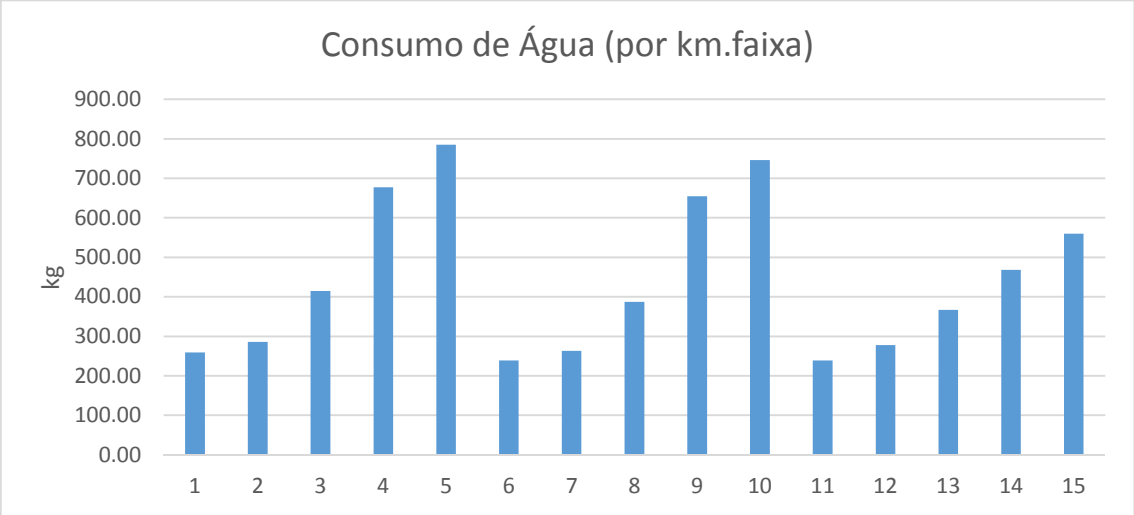


Figura 4.4 – Consumo de Água (Metodologia 2)

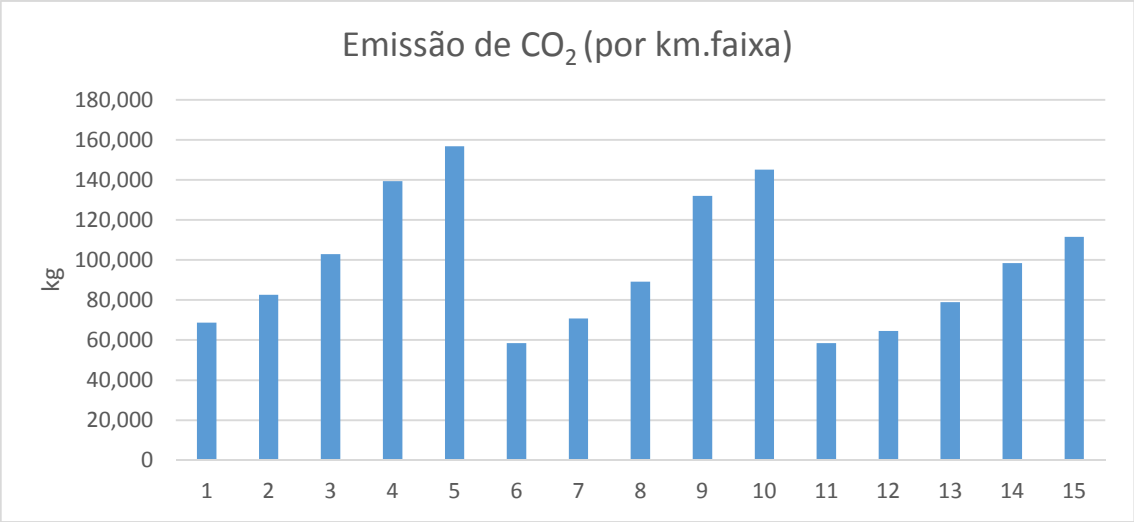


Figura 4.5 – Emissão de CO_2 (Metodologia 2)

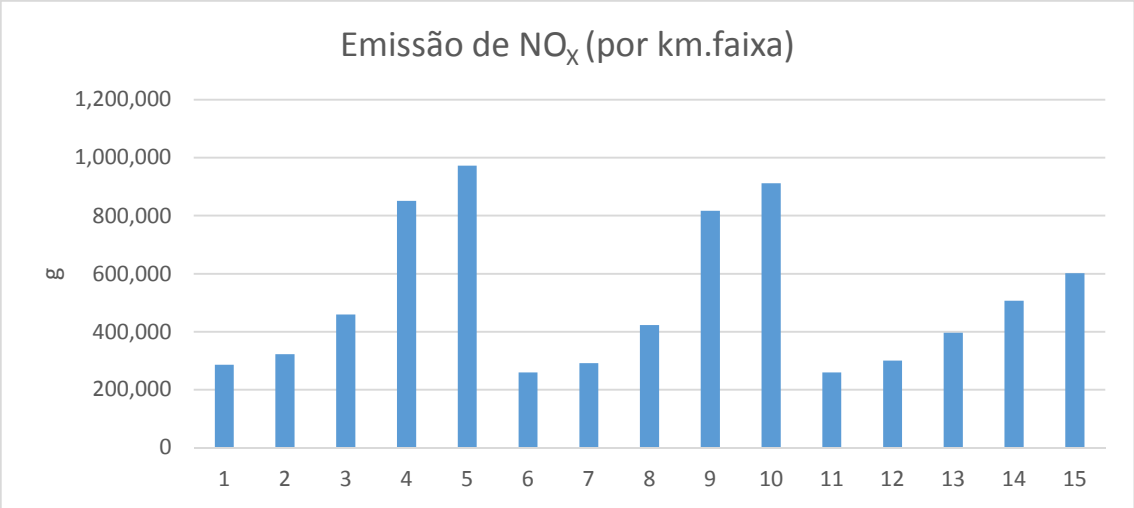


Figura 4.6 – Emissão de NO_X (Metodologia 2)

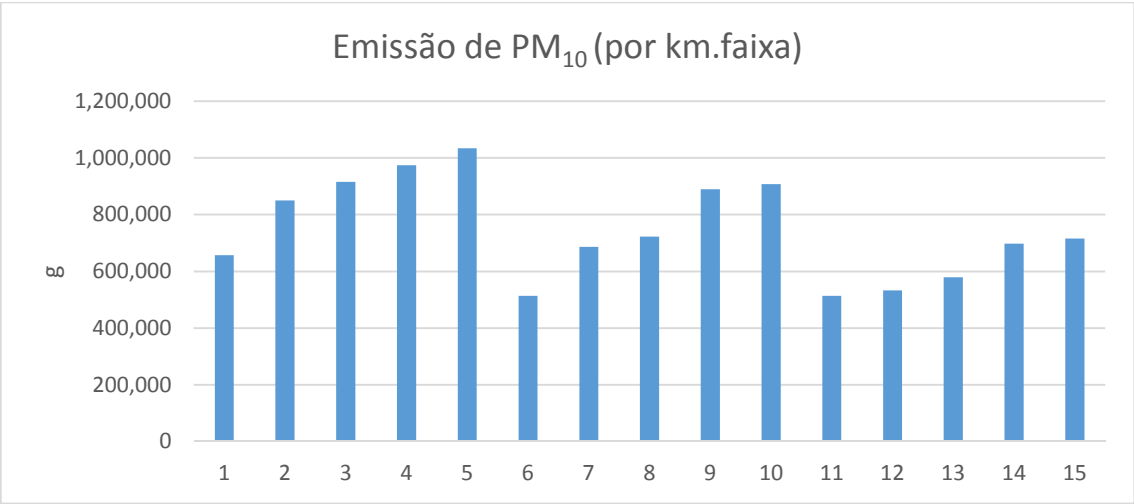


Figura 4.7 – Emissão de PM_{10} (Metodologia 2)

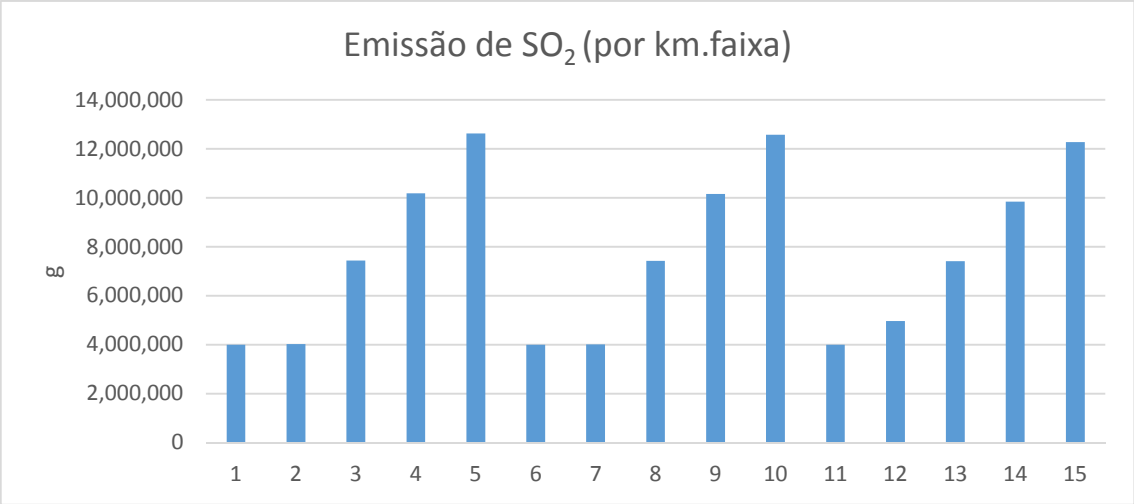


Figura 4.8 – Emissão de SO_2 (Metodologia 2)

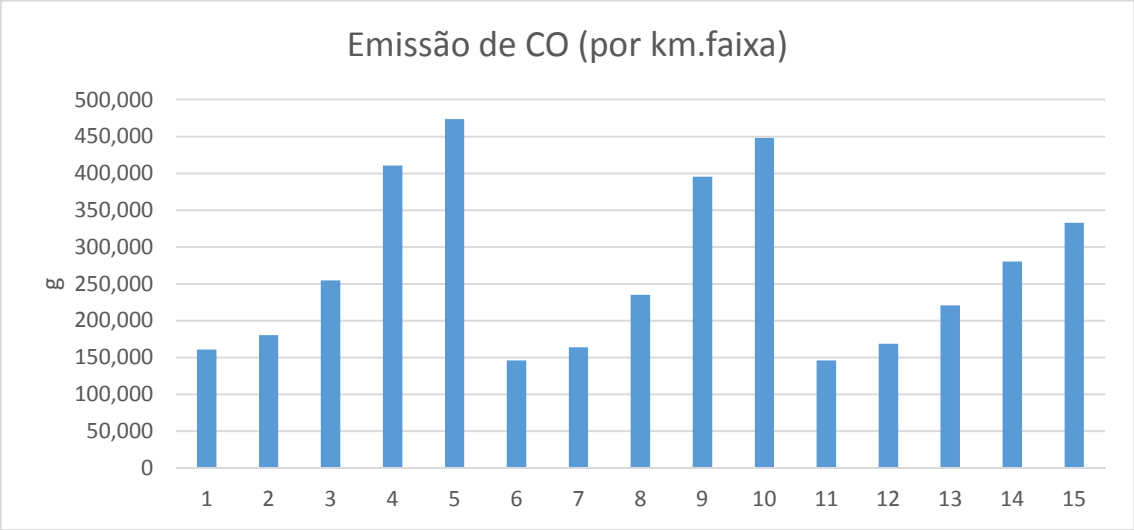


Figura 4.9 – Emissão de CO (Metodologia 2)

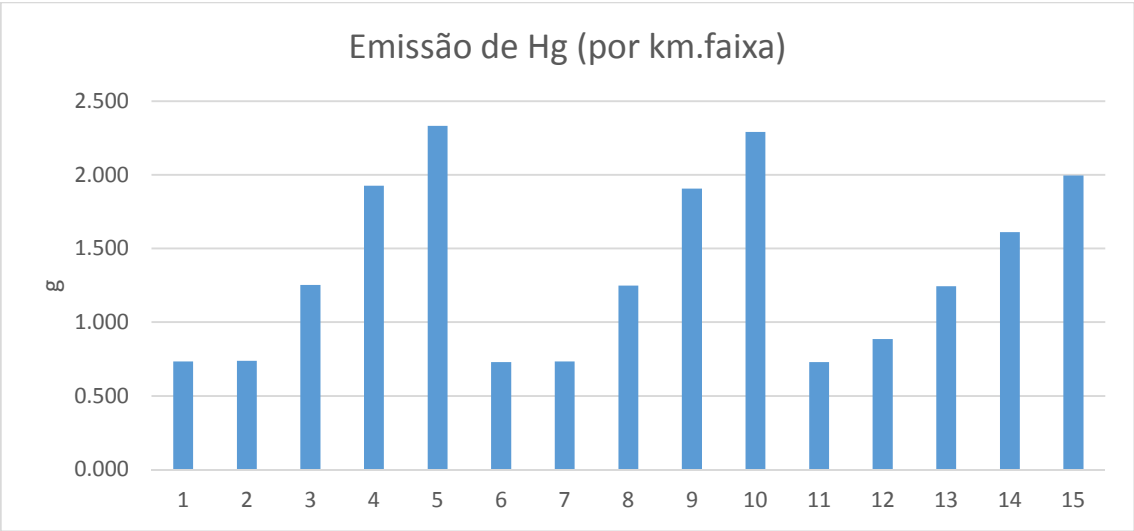


Figura 4.10 – Emissão de Hg (Metodologia 2)

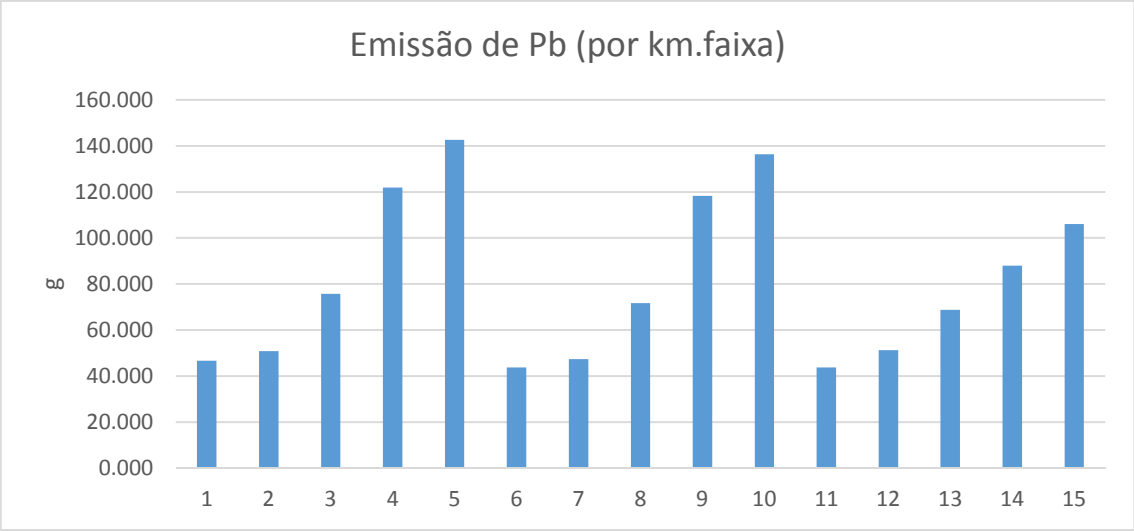


Figura 4.11 – Emissão de Pb (Metodologia 2)

4.2.5 Resultados Parciais

Ao final da análise ambiental das estruturas dimensionadas, é possível verificar padrões como o crescimento das emissões consumos conforme o tráfego aumenta e um leve decréscimo nestes itens à medida que a condição de suporte do subleito melhora.

Estes fatores motivam a execução da terceira metodologia neste estudo de caso, buscando encontrar este padrão ao analisar matrizes ainda maiores de soluções, separadas por tipo de estrutura (flexível, semirrígida e invertida).

4.3 METODOLOGIA 3: MATRIZ DE SOLUÇÕES

A metodologia 3 consiste em:

- Definição das matrizes de solução com as características dos materiais para cada tipo de estrutura (Flexível, Semirrígida e Invertida);
- Análise mecanicista nos pontos críticos de cada estrutura de pavimento proposta para retroanalisar o número N que a estrutura proposta pode suportar;
- Calcular SNC de cada estrutura proposta;
- Computar emissões de CO_2 para todas as estruturas analisadas;
- Analisar o comportamento dos três tipos de estrutura.

Todas as planilhas eletrônicas utilizadas neste estudo de caso estão apresentadas no Apêndice D.

4.3.1 Definição das matrizes de estudo

Para a metodologia 3 propõem-se três diferentes matrizes de estudo, sendo uma para cada tipo de estrutura. As três matrizes são provenientes de trabalhos propostos por Lopes (2012), sendo que a matriz para pavimentos flexíveis foi publicada e as demais são provenientes de trabalhos ainda não publicados.

A matriz das estruturas flexíveis é composta por revestimento base e subleito. O revestimento asfáltico tem espessuras que variam de 3,0 a 60,0 cm, módulo de resiliência variando de 2.250 a 4.500 MPa e coeficiente de Poisson igual 0,35. A camada de base é composta por material granular com espessuras variando entre 15,0 e 60,0 cm, módulo de resiliência entre 75 e 450 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,40. Por fim, para o subleito adotou-se coeficiente de Poisson igual a 0,45 e módulos de resiliência variando entre 25 e 150 MPa. A Tabela 4.75 resume os valores adotados.

Tabela 4.75 – Matriz de Soluções - Flexível

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson
H_{CBUQ}	3 - 5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 – 3.000 – 3.750 – 4.500	0,35
H_{BASE}	15 - 30 - 45 - 60	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H_{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150	0,45

Nesta configuração, a matriz atual apresenta 4608 diferentes estruturas de pavimento a serem analisadas.

A matriz para pavimentos semirrígidos foi desenvolvida de forma similar, porém com o acréscimo de uma camada de sub-base. Assim, o revestimento asfáltico tem espessuras variando de 5,0 a 60,0 cm, módulo de resiliência entre 2.250 e 4.500 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,35. A base, desta vez modificada por cimento, tem espessuras entre 10,0 cm e 30,0 cm, módulos de resiliência mais elevados variando entre 1.000 e 10.000 kgf/cm² e coeficiente de Poisson igual a 0,20. A sub-base granular com módulos de resiliência entre 75 e 450 MPa, espessura também entre 10,0 e 30,0 cm e coeficiente de Poisson igual a 0,40. O subleito possui módulo de resiliência variando entre 25 e 200 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,45. A Tabela 4.76 resume os valores adotados.

Tabela 4.76 – Matriz de Soluções - Semirrígido

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson
H_{CBUQ}	5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 – 3.000 – 3.750 – 4.500	0,35
H_{BGTC}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	1.000 – 2.500 - 5.000 – 7.500 – 10.000	0,20
H_{BASE}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H_{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200	0,45

Por ter uma camada a mais do que a matriz anterior, e, desta forma, uma variedade maior de combinações, a matriz de estruturas semirrígidas possui um total de 147.000 combinações de estruturas.

A matriz das soluções de pavimento invertido, possui a mesma configuração da anterior, ou seja, revestimento, base, sub-base e subleito possuem mesmas espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson, porém com agora com a inversão da camada granular com a camada cimentada. A Tabela 4.77 resume os valores adotados.

Tabela 4.77 – Matriz de Soluções - Invertido

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poisson
H_{CBUQ}	5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 – 3.000 – 3.750 – 4.500	0,35
H_{BASE}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H_{BGTC}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	1.000 – 2.500 - 5.000 – 7.500 – 10.000	0,20
H_{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200	0,45

Como possui a mesma configuração da matriz de estruturas semirrígidas, obviamente possui o mesmo número de casos: 147.000.

4.3.2 Análise mecanicista e retroanalise do número N

Com as estruturas definidas nas matrizes, procedeu-se para análise mecanicistas dos pontos críticos de cada estrutura sendo eles:

- Estruturas flexíveis: Deformação vertical recuperável no topo da camada do revestimento (D_0); Deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ε_t) e; Deformação específica de compressão no topo da camada de subleito (ε_v);
- Estruturas semirrígidas: Deformação vertical recuperável no topo da camada do revestimento (D_0); Relação de tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (σ_t) e; Deformação específica de compressão no topo da camada de subleito (ε_v);
- Estruturas invertidas: Deformação vertical recuperável no topo da camada do revestimento (D_0); Deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ε_t); Relação de tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (σ_t) e; Deformação específica de compressão no topo da camada de subleito (ε_v).

Com base nos dados encontrados, utilizaram-se dos modelos mecanicistas que já vinham sendo empregados nas etapas de dimensionamento de estruturas nas outras metodologias de estudo de caso, para retroanalisar os valores de número N que a estrutura pode suportar. Como, para cada estrutura, são analisados entre 3 e 4 pontos, o correto é a adoção do menor valor de N encontrado desta retroanálise.

Durante a etapa de retroanálise, verificou-se que, para algumas estruturas o valor de N encontrado era muito baixo. Definiu-se que estruturas cujo N retroanalisado fosse menor do que $1x10^4$ seriam excluídas das análises. Foram 820 casos excluídos das estruturas flexíveis, 62.382 das estruturas semirrígidas e 5.247 das invertidas, totalizando a exclusão de 68.449 dos 298.608 casos propostos. Apesar da exclusão de aproximadamente 23% dos casos propostos, acredita-se que a amostra restante, de exatos 230.159 casos, ainda possui alta relevância para continuação do estudo.

Dado o grande volume de dados resultantes da análise mecanicista, os mesmos não serão apresentados no corpo do texto, porém todos os dados podem ser consultados na mídia física anexa a este trabalho onde os arquivos magnéticos se encontram salvos. Mesmo assim, a Tabela 4.78 resume a faixa de valores de número N encontrados na retroanálise.

Tabela 4.78 – Resultados da Retroanálise do Número N

Tipo de Estrutura	Casos Analisados	Faixa de Número N retroanalisado (repetições do eixo padrão)
Flexível	3.788	$1,01x10^4$ até $3,03x10^9$
Semirrígida	84.618	$1,00x10^4$ até $1,44x10^{10}$
Invertida	141.753	$1,00x10^4$ até $1,39x10^{10}$

4.3.3 Cálculo do SNC

O cálculo dos valores do número estrutural, seguiu a mesma metodologia adotada anteriormente e todos os dados também se encontram na mídia física anexa. A Tabela 4.79 apresenta a faixa de valores encontrados para cada um dos tipos de estrutura.

Tabela 4.79 – Faixas de Valores de SNC Encontrados

Tipo de Estrutura	Casos Analisados	Faixa de SNC
Flexível	3.788	1,42 até 15,23
Semirrígida	84.618	1,45 até 16,47
Invertida	141.753	1,35 até 14,35

4.3.4 Cálculo das emissões de CO_2

Após a exclusão das estruturas que apresentaram número N menor do que 1, foram calculadas as emissões de CO_2 para todas as estruturas remanescentes. Buscou-se focar os estudos nesta metodologia, nas emissões deste poluente em específico por se tratar do principal gás causador do efeito estufa. A Tabela 4.80 resume a faixa de valores de emissão encontrados para as matrizes estudadas.

Tabela 4.80 – Faixas de Emissão de CO_2

Tipo de Estrutura	Casos Analisados	Emissão de CO_2 (tn/km.faixa)
Flexível	3.788	31,63 até 415,18
Semirrígida	84.618	54,63 até 427,08
Invertida	141.753	54,63 até 416,98

4.3.5 Regressão Não Linear

Conforme citado anteriormente, a metodologia 3 foi motivada pelos resultados encontrados na metodologia 2. Desta forma, após a simulação de 230.159 casos para três diferentes tipos de estrutura, buscou-se encontrar uma maneira de relacionar parte das variáveis e resultados estudados de uma forma simplificada que favoreça a utilização prática dos conceitos vistos.

Analisando-se os resultados encontrados foi possível identificar uma forte relação entre a emissão de poluentes e as principais variáveis estudadas, sendo estas o tráfego, através do número N e a condição de suporte do subleito, através do CBR que aqui está sendo calculado como o módulo de resiliência adotado para o subleito divido por 100.

Buscou-se, assim, preparar uma análise de regressão não linear do tipo exponencial da emissão de CO_2 em do SNC, uma vez que esta variável é capaz de representar todas a estrutura dimensionada já computando a condição de suporte do subleito. A seguir são apresentadas as equações (4.11, (4.12 e (4.13 encontradas por meio desta análise e seus respectivos gráficos e valores de coeficiente de determinação (R^2). Os relatório dos resultados das regressões executadas no programa Excel estão apresentados no Apêndice E.

- <u>Emissão de CO_2 para estruturas de pavimento flexível (tn/km.faixa)</u>

$$ECO2_{FL} = 14{,}32 \cdot SNC^{1{,}260} \quad (4.11)$$

$$R^2 = 0{,}83$$

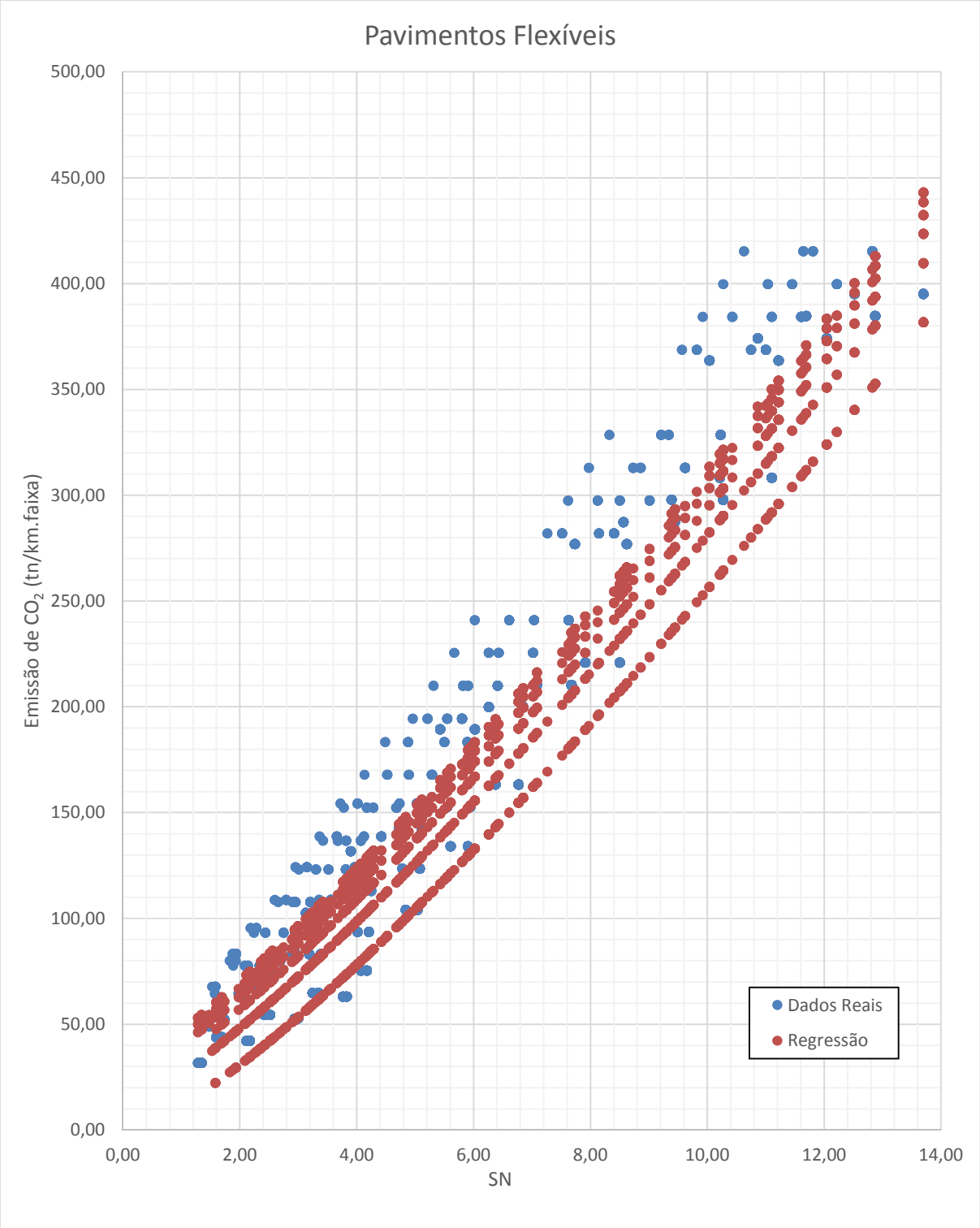


Figura 4.12 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Flexível

- <u>Emissão de CO_2 para estruturas de pavimento semirrígido (tn/km.faixa)</u>

$$ECO2_{SR} = 24{,}47 \cdot SNC^{1{,}054} \quad (4.12)$$

$$R^2 = 0{,}90$$

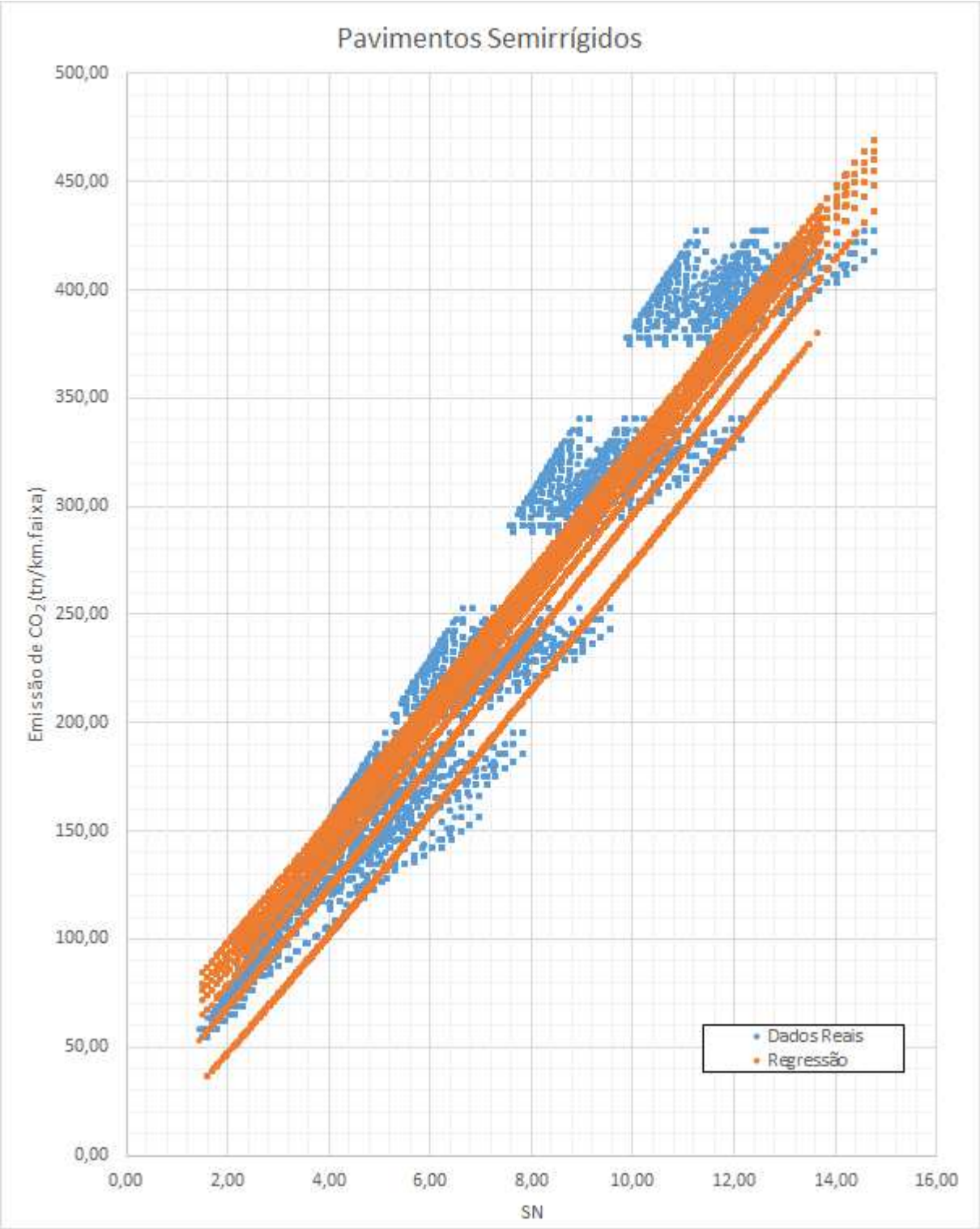


Figura 4.13 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Semirrígido

- <u>Emissão de CO_2 para estruturas de pavimento invertido (tn/km.faixa)</u>

$$ECO2_{IN} = 21{,}24 \cdot SNC^{1{,}139} \quad (4.13)$$

$$R^2 = 0{,}92$$

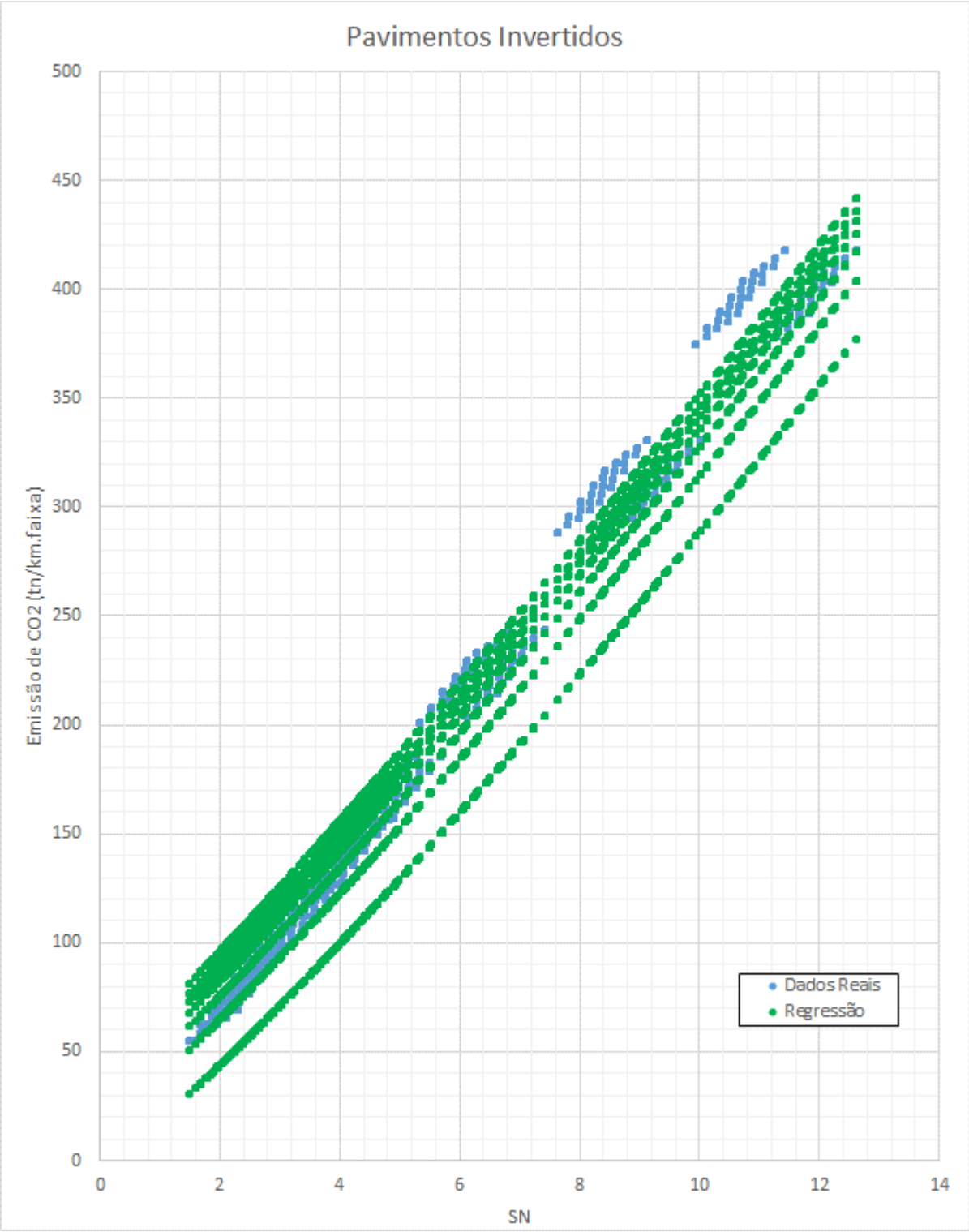


Figura 4.14 – Correlação entre emissão de CO_2 e SN para Pavimento Invertido

Cabe ressaltar que a proposta inicial era de elaborar equações para emissão de CO_2 em função não somente do SNC, mas do número N, do CBR e do SN. A regressão destes dados resultou em modelos de maior representatividade (valores de R^2 maiores do que os dos modelos apresentados) porém os expoentes atribuídos às varáveis N e CBR não condiziam com a realidade. O expoente do número N em todos os modelos apresentou valor negativo, ou seja, quanto maior o valor de N, menor seria a emissão de CO_2 ao passo que o expoente do CBR resultou em valores positivos, ou seja, quanto maior o CBR, maiores as emissões de CO_2. Estas relações não condiziam com o esperado e estudado até aqui. Com isso, optou-se por realizar a regressão com o SNC que, apesar de resultar em modelos de menor representatividade, os modelos são fiéis ao esperado para o fenômeno das emissões. Todas as regressões realizadas, inclusive as excluídas, se encontram no Apêndice E.

5 CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA ESCOLHA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

O objetivo deste estudo é poder contribuir de alguma forma com a inserção de etapa ambiental na escolha de estruturas de pavimento. Pôde-se observar com o que foi estudado que uma avaliação ambiental possui elevado grau de complexidade pois, além de envolver diversas variáveis, ainda sofre com a falta de estudos mais específicos e multidisciplinares, como este.

A primeira contribuição deste trabalho neste âmbito, foi feita no item 3.2.5 com a proposta dos índices de ecoeficiência, que já foram explicados e que serão apenas citados neste capítulo.

Apesar das dificuldades encontradas, propõe-se como contribuição principal uma sugestão metodológica de avaliação estrutural-econômica-ambiental para escolha de alternativas de pavimento asfáltico utilizando as equações encontradas na metodologia 3 do estudo de caso.

Desta forma, este capítulo é dedicado a apresentar a metodologia proposta com um exemplo de aplicação indicando a forma correta de utilização das equações, as quais devem ser aplicadas apenas para caráter comparativo.

5.1 ANÁLISE ESTRUTURAL-ECONÔMICA-AMBIENTAL

São apresentados os passos da metodologia proposta:

- Definição dos parâmetros de projeto (tráfego e condição de suporte de subleito) e escolha dos materiais;
- Dimensionamento pelas metodologias vigentes e pertinentes (DNIT, DER, SIURB e etc.) e cálculo do SN;
- Verificação mecanicista das estruturas dimensionadas (Fim da análise técnica);
- Computar emissões de CO_2 (tn/km.faixa) para cada estrutura dimensionada utilizando as equações propostas (Fim da análise ambiental);
- Computar o preço de cada solução (R$/km.faixa) com auxílio da tabela de preços unitários pertinente (SICRO, DER, SIURB, SINAPI e etc.);
- Precificar as emissões de CO_2 com valores de crédito de carbono praticados pela bolsa de valores (Etapa opcional);

- Ranquear soluções por custo e por emissões;
- Avaliar a melhor opção de acordo com as premissas de projeto (fim da análise estrutural-econômica-ambiental).

A Figura 5.1 elucida a metodologia descrita.

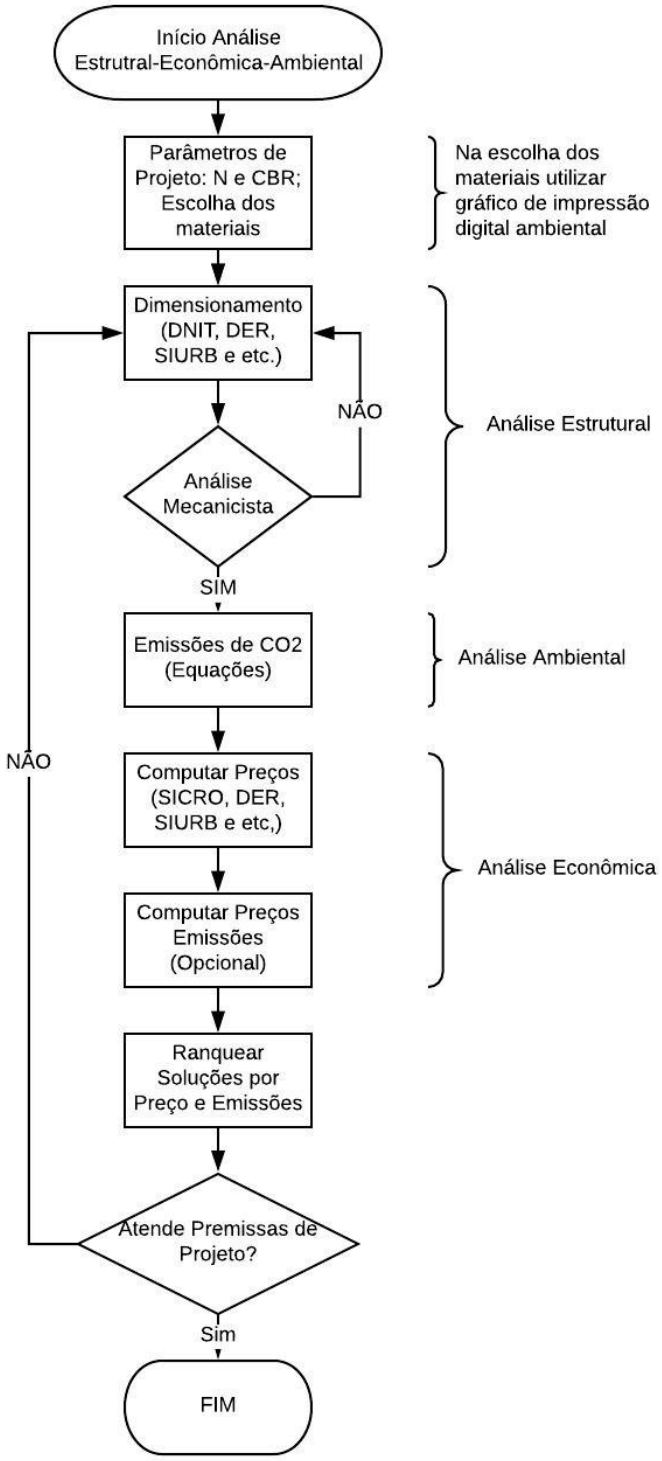


Figura 5.1 – Fluxograma da Análise Estrutural-Econômica-Ambiental

5.1.1 Exemplo de Aplicação

Parâmetros de Projeto e Dimensionamento

Como exemplo, optou-se por utilizar novamente o caso da metodologia 1, uma vez que já existem estruturas dimensionadas para os parâmetros de projeto adotados (CBR=8% e N=4,8x10^7). Nesta metodologia foram dimensionadas oito estruturas no total, sendo uma base e outras sete alternativas. Destas oito alternativas, pode-se utilizar como exemplo a estrutura base, a número 4 e a número 7 sendo estas estruturas de pavimento flexível, semirrígido e invertido respectivamente.

Tabela 5.1 – Estruturas dimensionadas

Base (Flexível) - SN=3,98		Alt. 4 (Semirrígido) - SN=4,14		Alt. 7 (Invertido) - SN=4,43	
Material	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**	**Material**	**Esp. (cm)**
CBUQ	10	CBUQ	10	CBUQ	10
BGS	15	BGTC	17	BGS	15
Solo-brita	40	Solo-brita	15	BGTC	17
Subleito (CBR≥8%)		Subleito (CBR≥8%)		Subleito (CBR≥8%)	

Como as estruturas já se encontram dimensionadas, as primeiras etapas da análise proposta já estão prontas. Caso as estruturas não estivessem dimensionadas, se recomendaria a utilização do gráfico de impressão digital ambiental e a tabela gerada a partir dele como referência para escolha de materiais com menor potencial poluidor previamente ao dimensionamento. Ressalta-se, novamente, que os materiais com maior potencial poluidor não devem ser evitados, pelo contrário, sua utilização deve ser avaliada de acordo com as necessidades do projeto. A próxima etapa é referente as emissões de CO_2.

Cálculo das Emissões de CO_2

Nesta etapa, basta a utilização das equações 4.11, 4.12 e 4.13 propostas para cada tipo de estrutura estudado.

$$ECO2_{FL} = 14{,}32 \cdot SNC^{1{,}260} \quad (4.11)$$

$$ECO2_{SR} = 24{,}47 \cdot SNC^{1{,}054} \quad (4.12)$$

$$ECO2_{IN} = 21{,}24 \cdot SNC^{1{,}139} \quad (4.13)$$

A Tabela 5.2 resume os valores encontrados com as equações e compara os mesmos com os encontrados no PaLATE, quando as estruturas foram estudadas na metodologia 1 do estudo de caso.

Tabela 5.2 – Emissões de CO_2

Estrutura	Tipo	N	CBR	SNC	ECO2 (tn/km.faixa) Equação
Base	Flexível	4,80E+07	8	5,03	109,63
4	Semirrígido	4,80E+07	8	5,19	138,81
7	Invertido	4,80E+07	8	5,49	147,75

Após a análise é possível notar que a estrutura flexível é a de menor emissão de CO_2, seguida pela estrutura semirrígida e invertida como a que mais emite CO_2.

Cálculo dos Custos de Implantação

Para este exemplo optou-se, por utilizar a tabela vigente de preços unitários do DER-SP com data base de dezembro de 2017. Compõe-se cada solução utilizando os itens da tabela de preços unitários. As tabelas a seguir apresentam os custos para cada solução sendo que o valor final representa o valor necessário para construção de uma faixa com 3,50 metros de largura e 1,0 quilômetro de extensão.

Tabela 5.3 – Custos para Pavimento Flexível – Alternativa Base

PAVIMENTO FLEXÍVEL - ALTERNATIVA BASE							
Item	Descrição	Un.	Área (m^2)	Esp. (m)	Quant.	TPU DER-SP Preço Unitário	TPU DER-SP Preço Total
23.08.03.01.99	CAMADA ROLAMENTO-CBUQ GRADUACAO C-S/DOP	m3	3.500,00	0,040	140,00	804,17	112.583,80
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.08.02.01.99	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B S/DOP	m3	3.500,00	0,060	210,00	748,39	157.161,90
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.05.01.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	6,36	22.260,00
23.04.03.01.99	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	3.500,00	0,150	525,00	198,34	104.128,50
23.04.02.09.02.99	SUB BASE OU BASE DE SOLO BRITA 70% BRITA COM TRANSP.JAZIDA ATE LOCAL APLICAÇÃO	m3	3.500,00	0,400	1.400,00	165,50	231.700,00
23.02.01.99	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EN	m2	3.500,00	-	3.500,00	1,51	5.285,00
22.02.01.99	ESCAVACAO E CARGA DE MATERIAL DE 1/2A CATEGORIA	m3	3.500,00	0,650	2.275,00	6,44	14.651,00
						TOTAL	**R$ 664.010,20**

Tabela 5.4 – Custos para Pavimento Semirrígido – Alternativa 4

PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO - ALTERNATIVA 4							
Item	Descrição	Un.	Área (m^2)	Esp. (m)	Quant.	TPU DER-SP	
						Preço Unitário	Preço Total
23.08.03.01.99	CAMADA ROLAMENTO-CBUQ GRADUACAO C-S/DOP	m3	3.500,00	0,040	140,00	804,17	112.583,80
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.08.02.01.99	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B S/DOP	m3	3.500,00	0,060	210,00	748,39	157.161,90
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.05.01.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	6,36	22.260,00
23.04.04.04.99	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. C/CIM 4%VOL	m3	3.500,00	0,170	595,00	230,79	137.320,05
23.04.02.09.02.99	SUB BASE OU BASE DE SOLO BRITA 70% BRITA COM TRANSP.JAZIDA ATE LOCAL APLICAÇÃO	m3	3.500,00	0,150	525,00	165,50	86.887,50
23.02.01.99	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EN	m2	3.500,00	-	3.500,00	1,51	5.285,00
22.02.01.99	ESCAVACAO E CARGA DE MATERIAL DE 1/2A CATEGORIA	m3	3.500,00	0,420	1.470,00	6,44	9.466,80
						TOTAL	**R$ 547.205,05**

Tabela 5.5 – Custos para Pavimento Invertido – Alternativa 7

PAVIMENTO INVERTIDO - ALTERNATIVA 7							
Item	Descrição	Un.	Área (m^2)	Esp. (m)	Quant.	TPU DER-SP	
						Preço Unitário	Preço Total
23.08.03.01.99	CAMADA ROLAMENTO-CBUQ GRADUACAO C-S/DOP	m3	3.500,00	0,040	140,00	804,17	112.583,80
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.08.02.01.99	CONC.ASF.US.QUENTE - BINDER GRAD.B S/DOP	m3	3.500,00	0,060	210,00	748,39	157.161,90
23.05.02.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA LIGANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	2,32	8.120,00
23.05.01.99	IMPRIMADURA BETUMINOSA IMPERMEABILIZANTE	m2	3.500,00	-	3.500,00	6,36	22.260,00
23.04.03.01.99	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. SIMPLES	m3	3.500,00	0,150	525,00	198,34	104.128,50
23.04.04.04.99	SUB-BASE OU BASE BRITA GRAD. C/CIM 4%VOL	m3	3.500,00	0,170	595,00	230,79	137.320,05
23.02.01.99	MELH/PREPARO SUB-LEITO - 100% EN	m2	3.500,00	-	3.500,00	1,51	5.285,00
22.02.01.99	ESCAVACAO E CARGA DE MATERIAL DE 1/2A CATEGORIA	m3	3.500,00	0,420	1.470,00	6,44	9.466,80
						TOTAL	**R$ 564.446,05**

Vale ressaltar que, como exemplo, computou-se apenas os custos iniciais de construção para que os mesmos fizessem a vez da parcela econômica da análise. A metodologia completa consiste em avaliar também os custos de manutenção e reabilitação do pavimento ao longo da vida útil do mesmo.

Considerando apenas o custo inicial de construção, é possível verificar que a estrutura mais viável economicamente para este estudo de caso é a de pavimento invertido, seguida pela estrutura semirrígida e por último a estrutura flexível. A parcela econômica, desta forma, contrasta com a parcela ambiental para este exemplo.

Cálculo dos Custos de Referência das Emissões

Sugere-se computar os valores de referência da emissão de CO_2 na atmosfera por meio dos preços praticados na bolsa de valores para ICO2 (Índice Carbono Eficiente). Tomando como base a cotação no mês de dezembro de 2017 (mesma data base da TPU do DER-SP), onde os preços do índice variaram entre R$ 1.690,00 e R$ 1.750,00 por tonelada de CO_2. Adotando o menor valor como referência, pode-se precificar as emissões de carbono conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Custos das Emissões de CO_2

Estrutura	Tipo	ECO2 (tn/km.faixa)	Cotação ICO2 (R$/tn)	Custo de Referência das Emissões (R$)
Base	Flexível	109,63	1.690,00	R$ 185.270,12
4	Semirrígido	138,81	1.690,00	R$ 234.588,69
7	Invertido	147,75	1.690,00	R$ 249.697,46

Ressalta-se que o valor encontrado se trata apenas de um valor de referência cujo objetivo principal é auxiliar na tomada de decisões e na justificativa da escolha de uma alternativa face as demais. Os valores encontrados não representam nenhuma economia ou gasto extra nos custos finais da obra, porém ajudam a visualizar de uma outra forma os ganhos ambientais ao final.

Etapa Final: Ranquear preços e emissões

Após as etapas técnica, ambiental e econômica analisadas separadamente, basta uma análise final de todos os valores e parâmetros encontrados.

A análise técnica indica que todas as estruturas estão adequadas para os parâmetros de projeto adotados (CBR=8% e N=4,8x10^7), neste caso todas as estruturas são recomendadas.

Pela a análise ambiental, se recomendaria a adoção da estrutura flexível, uma vez que esta apresenta a menor emissão de CO_2 para atmosfera, descartando as estruturas semirrígida e invertida caso o critério de escolha seja exclusivamente o ambiental.

Tabela 5.7 – Ranking Análise Ambiental

Estrutura	Tipo	ECO2 (tn/km.faixa)	Ranking
Base	Flexível	109,63	1
4	Semirrígido	138,81	2
7	Invertido	147,75	3

Avaliando a análise econômica utilizando apenas os custos de construção, caso o fator de decisão seja exclusivamente este, a escolha pela estrutura flexível não parece a mais adequada, uma vez que os custos desta são aproximadamente 21% maiores do que a estrutura semirrígida. Neste caso, se recomendaria a adoção da estrutura semirrígida seguido pela solução invertida e por último a solução flexível.

Tabela 5.8 – Ranking Análise Econômica

Estrutura	Tipo	Custos Construção (R$)	Ranking
Base	Flexível	R$ 664.010,20	3
4	Semirrígido	R$ 547.205,05	1
7	Invertido	R$ 564.446,05	2

Combinando a análise econômica com a ambiental, através da utilização dos valores do ICO2, pode-se concluir que a estrutura que apresenta maior equilíbrio entre custos de construção e emissões de CO_2 é a estrutura semirrígida e esta deve ser escolhida como a estrutura a ser implantada após análise técnico-econômica-ambiental.

Tabela 5.9 – Resumo Análise Técnico-Econômica-Ambiental

Estrutura	Tipo	Técnica	ECO2 (tn/km.faixa)	Custo de Referência das Emissões (R$)	Custos Construção (R$)	Custos Totais (R$)	Ranking
Base	Flexível	ok	92,64	185.270,12	664.010,20	849.280,32	3
4	Semirrígido	ok	131,33	234.588,69	547.205,05	781.793,74	1
7	Invertido	ok	148,13	249.697,46	564.446,05	814.143,51	2

Apesar da opção neste exemplo ser pela estrutura semirrígida, salienta-se que a escolha final deve ser critério do projetista, que deve analisar todas as premissas do projeto e pesar a questão ambiental de forma que não comprometa a parte técnica e tão pouco os custos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÔES

6.1 CONCLUSÔES

Podem ser calculados diversos tipos de impactos ambientais e volumes de poluentes com diferentes contribuições aos danos ambientais e à saúde do ser humano, tornando muito difícil a avaliação de qual poluente causa o dano mais significativo.

Apesar dos diversos poluentes gerados nos processos de produção dos materiais e execução do pavimento, recomenda-se que as emissões de CO_2 sejam utilizadas para a análise do impacto ambiental das soluções de pavimentação.

A análise proposta limita-se à seleção do tipo de pavimento e deve ser conduzida em uma etapa anterior ao projeto, sendo uma análise conduzida em nível de projeto preliminar, ou anteprojeto, desta maneira verificou-se que a utilização do software PaLATE é suficiente e adequada para quantificar os impactos ambientais e os volumes de poluentes.

Verificou-se que, independente do poluente ou do item de consumo (energia ou água), para os valores iniciais, os materiais que podem ser utilizados na camada de revestimento emitem mais poluentes e geram maior consumo quando comparados aos materiais que são utilizados como base e sub-base de pavimentos.

O gráfico de impressão digital ambiental gerado ajuda na análise completa das emissões. Este gráfico, juntamente com a normalização dos Índices de Ecoeficiência, permitiram o cálculo das áreas dos polígonos de cada material, fornecendo com maior precisão um ranking de ecoeficiência dos materiais que pode ser utilizado durante a análise estrutural-econômica-ambiental para orientar a seleção dos materiais a serem utilizados. Pode ser utilizado como uma certificação ambiental para classificar materiais e serviços, porém a análise deve sempre ser ponderada de acordo com as características mecânicas e técnicas de cada material a ser considerado.

Após as análises individuais por camada (metodologia 1) e a análise geral das estruturas (metodologia 2), verificou-se que não há unanimidade quando se trata de materiais menos poluentes no dimensionamento dada a variedade de poluentes e itens de consumos analisados aliados às diferentes necessidades estruturais do dimensionamento onde em alguns casos materiais menos poluentes necessitam de maiores espessuras dadas as suas características físicas compensando as menores

espessuras de materiais mais poluentes, porém de módulo de resiliência mais elevado, como é o caso dos materiais de revestimento.

Por outro lado, verificou-se certos padrões em alguns poluentes como o material particulado (PM_{10}) e Óxidos de Nitrogênio (NO_X). Constatou-se que materiais estritamente granulares emitem mais PM_{10} do que outros materiais ao passo que materiais com maior teor de cimento Portland tendem a emitir mais NO_X. Mesmo assim, não se pode concluir que a utilização de cimento portland, por exemplo, deve ser evitada por emitir mais determinado poluente do que outro. A questão principal é a otimização da maneira de obtenção dos materiais reduzindo a emissão de poluentes com auxílio de novas tecnologias sustentáveis ou até mesmo, desenvolvimento de novos insumos e materiais que poluem menos tanto na obtenção quanto na aplicação e que são capazes de substituir mecanicamente os materiais convencionais.

Ao propor matrizes com um grande número de soluções na metodologia 3 foi possível encontrar equações que podem simular de maneira mais simples uma análise de emissões de CO_2 sem ter que passar pelo programa PaLATE. Desta forma, recomenda-se a utilização das equações na avaliação de estruturas de anteprojeto e/ou projeto básico uma vez que as mesmas representam bem as emissões de CO_2 em função dos principais parâmetros do projeto e da estrutura.

As equações juntamente com o gráfico de impressão digital ambiental, configuram como as principais ferramentas que este trabalho propõe como contribuição.

No capítulo 5, buscou-se, utilizando as ferramentas apresentadas, inserir a parcela ambiental na análise da escolha do tipo de pavimento. O conceito proposto não pretende tornar a questão ambiental como fator determinante na escolha entre estruturas de pavimento, porém pretende torná-la parte a ser considerada na decisão.

Ter uma estrutura escolhida através de análise estrutural-econômica-ambiental não só agrega valor social ao estudo, uma vez que a sociedade tende a ter uma melhor recepção para projetos verdes, conforme discussão no capítulo 2 a respeito dos selos e certificações ambientais, mas também contribui na busca do desenvolvimento sustentável ou para que cada vez menos a humanidade necessite do adjetivo sustentável para a palavra desenvolvimento.

6.2 RECOMENDAÇÕES

A seguir estão apresentados tópicos com recomendações para trabalhos futuros objetivando a continuação da pesquisa até aqui apresentada.

6.2.1 Adaptação do PaLATE aos Padrões Brasileiros

A primeira sugestão fazia parte do escopo inicial deste trabalho, porém, após análise cuidadosa pôde-se concluir que o volume de trabalho relativo a este tópico poderia ser tema de uma nova dissertação. Inclusão de modelos para equipamentos, métodos construtivos e materiais mais próximos da realidade e dos padrões brasileiros aumentariam significativamente a precisão do programa. Tais melhorias são possíveis uma vez que o programa é apresentado em planilha eletrônica aberta para inclusão de novos elementos.

6.2.2 Inclusão de Estruturas de Pavimento Rígido

Apesar deste item não ter feito parte do escopo original desta pesquisa, a sua inclusão foi considerada quando foram verificados padrões de emissões de poluentes para itens com teor de cimento. Foi opção novamente descartada dado ao volume de análise necessário, porém a obtenção de equação através de regressão não linear conforme os outros casos analisados, complementaria esta pesquisa e a análise Técnico-Econômica-Ambiental.

6.2.3 Melhorias na Obtenção dos Materiais

Outro tópico interessante que seria tema de uma nova dissertação, seria a avaliação de todo o processo de extração e obtenção dos materiais estudados visando encontrar lacunas no processo onde seja possível a aplicação de medidas sustentáveis visando diminuir não só as emissões de poluentes e consumos de água e energia, mas evitando desperdícios no processo.

Novos processos e equipamentos, levariam a novos modelos de emissões e consumos que levariam a novas equações de previsão e novas pesquisas como está. Busca-se, enfim, dar continuidade a este ciclo virtuoso que leva a humanidade a interagir cada vez melhor com o meio ambiente.

6.2.4 Atualização do Gráfico de Impressão Digital Ambiental

Neste novo trabalho, as escalas para cada poluente e item de consumo estudado, poderiam ser alteradas em função da importância de determinado item em comparação com os demais. Estudos multidisciplinares ajudariam a refinar e atualizar o gráfico de impressão digital ambiental sugerido.

Ainda neste tópico, novos materiais poderiam ser estudados, incluídos e ranqueados aumentando a base de dados disponível para auxiliar os projetistas na escolha dos melhores materiais disponíveis.

6.2.5 Análise complementar incluindo o ciclo de vida útil do pavimento

O presente estudo contemplou apenas a construção inicial do pavimento. Como novo trabalho, poderia ser considerada toda a análise do ciclo de vida do pavimento. Sugere-se simulações com programa HDM-4 ou similar, capaz de prever o desempenho das estruturas considerando ou não a aplicação de manutenções.

Com um estudo completo do ciclo de vida do pavimento seria possível a elaboração de avaliação econômica completa incluindo os custos e emissões dos serviços de manutenção e reabilitação do pavimento, complementando a análise estrutural-econômica-ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Guide for Design of Pavements Structures**. Washington D.C., 1993.

ANDRADE, M. F. **Poluição Atmosférica.** São Paulo: Sala de Leitura, 2011. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207: terminologia e classificação de pavimentação.** Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

BACCI, D. L. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M. **Aspectos e Impactos Ambientais de Pedreira em Área Urbana.** São Paulo, 2006. 8 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. 1ªed. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al*. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.

CHAPPAT, M.; BILAL, J. **Sustainable Development: The Environmental Road of the Future, life cycle analysis.** Paris: COLAS, 2003.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Plano de Controle de Poluição Veicular 2014-2016.** São Paulo: CETESB, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986.** Brasília: Diário Oficial da União, 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Brasília: Diário Oficial da União, 1997.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO – DER/SP. **IP-DE-P00/001 – Projeto de Pavimentação**. São Paulo, 2006. 53 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DE SÃO PAULO – DER/SP. **IP-DE-S00/004 – Elaboração do Plano Básico Ambiental para Licença Ambiental de Instalação**. São Paulo, 2007. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-PRO 269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV.** Brasília, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **IPR 719 – Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Custos Rodoviários do Sistema de Custos Rodoviários – SICRO2.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A - DERSA. **Programa Rodoanel Mário Covas (Trecho Norte): Estudo de Impacto Ambiental – EIA.** São Paulo, 2010a.

DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A - DERSA. **Programa Rodoanel Mário Covas (Trecho Norte): Relatório de Impacto Ambiental – RIMA.** São Paulo, 2010b.

DORCHIES, P. T. **The Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions.** Ontario, 2008. 19 p.

DUMITRESCU L.; MAXINEASA, S. G.; SIMION, I. M.; TARANU, N.; ANDREI, R.; GAVRILESCU, M. **Evaluation of the Environmental Impact of Road Pavements From a Life Cycle Perspective.** Romenia: Environmental Engineering and Management Journal, 2014.

ENERGY TECHNOLOGY SUPPORT UNIT. **Emissions Modelling Framework for HDM-4.** Oxforshire, 1997.

GREENROADS. **Greenroads Rating System V2.** V2 Edition. Redmond: Greenroads International, 2015. 113 p.

GREENROADS. **Featured Projects and Portfolio.** Disponível em: <https://www.greenroads.org/portfolio>. Acesso em: 03 fev. 2018

HORVATH, A. **A Life-Cycle Analysis Model and Decision-Support Tool for Selecting Recycled Versus Virgin Materials for Highway Applications.** Berkley: University of California, 2004a. 35 p.

HORVATH, A. **Construction Materials and the Environment.** Berkley: University of California, 2004b. 28 p.

KERALI, H. G. R.; ODOKI, J. B.; STANNARD, E. E. **HDM-4 Volume 1: Overview of HDM-4.** Version 2.0. Birmingham: World Bank, 2000. 47 p.

LEADERSHIP IN ENERGY & ENIRONMENTAL DESIGN. **Reference Guide for Neighborhood Development.** V4 Edition. Washington: U.S. Green Building Council, 2014. 542 p.

LOPES, F. M. **Pavimentos Flexíveis com revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação.** 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MILLER, T. D.; BAHIA, H. U. **Sustainable Asphalt Pavements: Technologies, Knowledge Gaps and Opportunities.** Madison: University of Wisconsin, 2009. 7 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Acordo de Paris.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 11 dez. 2016.

MINISTRY OF TRANSPORTATION ONTARIO - MTO. **Pavement Design and Rehabilitation Manual.** 2nd Edition. Ontario: Material Engineering and Research Office, 2013.

MOROSIUK, G.; RILEY, M.; TOOLE, T. **HDM-4 Volume 2: Applications Guide.** Version 2.0. Birmingham: World Bank, 2000. 132 p.

MOROSIUK, G.; RILEY, M.; ODOKI, J. **HDM-4 Volume 6: Modelling Road Deterioration and Works Effects.** Version 2.0. Birmingham: World Bank, 2004. 296p.

MOZETO, A. A. **Química Atmosférica: A Química Sobre Nossas Cabeças.** São Paulo, 2001.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **The Relentless Rise of Carbon Dioxide.** Disponível em: <https://climate.nasa.gov/climate_resources/24/> . Acesso em: 19 nov. 2016.

ODOKI, J. B.; KERALI, H. G. R. **HDM-4 Volume 4: Analytical Framework and Model Descriptions.** Version 2.0. Birmingham: World Bank, 2000. 627 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**. Vol. 1522. Montreal: ONU, 1987. 49 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Kyoto: ONU, 1998. 20 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Paris Agreement**. Paris: ONU, 2015. 25 p.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Instrução de Projeto 02: Classificação das Vias.** São Paulo: Secretaria de Infraestrutura Urbana, 2004a. 18 p.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Instrução de Projeto 08: Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas do Pavimento**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura Urbana, 2004b. 12 p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Copiarte, 2002. 269 p.

PONTES. J. C.; LIMA, V. L. A.; SILVA, V. P. **Impactos Ambientais do Desmonte de Rocha com Uso de Explosivos em Pedreira de Granito de Caicó, RN.** São Paulo: UNESP, 2016. 10 p.

RECYCLED MATERIALS RESOURCE CENTER – RMRC. Disponível em: <https://rmrc.wisc.edu/>. Acesso em: 16 mai, 2016

ROBERTS F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D.; KENNEDY, T. W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.** Second Edition. Lanham: NAPA Educational Foundation, 1996.

ROCHA, S. M. M. **Previsão de Indicadores de Qualidade de Ar Exterior em Ambiente Urbano.** Porto: Faculdade de Economia do Porto, 2014. 107 p.

SALING, P.; KICHERER, A.; DITTRICH-KRÄMER, B.; WITTLINGER, R.; ZOMBIK, W.; SCHMIDT, I.; SCHROTT, W.; SCHMIDT, S. **Eco-efficiency Analysis by BASF: The Method.** Landsberg, 2002.

SANTOS, J. M.; THYAGARAJAN, S.; KEIJZER, E.; FLORES, R. F.; FLINTSCH, G. **Pavement Life Cycle Assessment – A Comparison of American and European Tools.** Champaign: Pavement Life-Cycle Assessment Symposium, 2017. 12 p.

STANNARD, E. E; WIGHTMAN, D. C.; DAKIN, J. M. **HDM-4 Volume 3: Software User Guide.** Version 2.0. Birmingham: World Bank, 2000. 200 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Carbon Monoxide Trends.** Disponível em: <https://www.epa.gov/air-trends/carbon-monoxide-trends>. Acesso em: 22 jan. 2017a.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and $PM_{2,5}$) Forecasting Program.** North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards, 2003. 126 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Information About Lead Air Pollution.** Disponível em: <https://www.epa.gov/lead-air-pollution/basic-information-about-lead-air-pollution>. Acesso em: 22 jan. 2017b.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Mercury and Air Toxics Standarts (MATS).** Disponível em: <https://www.epa.gov/mats>. Acesso em: 22 jan. 2017c.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Particulate Matter (PM) Air Quality Standards.** Disponível em: <https://www.epa.gov/naaqs/particulate-matter-pm-air-quality-standards>. Acesso em: 22 jan. 2017d.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Sulfur Dioxide Pollution.** Disponível em: <https://www.epa.gov/so2-pollution>. Acesso em: 22 jan. 2017e.

APÊNDICE A – VOLUMES DE MATERIAL INSERIDOS NO PALATE PARA ANÁLISE UNITÁRIA

Concreto de Cimento Portland – CCP

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Concrete Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	35	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84		0,621371	tanker truck
	Cement	1,27	10	0,621371	barge
	Concrete Additives	0,84	0,02	0,621371	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84	0		
	Steel Reinforcing Bars	0,24	0,05	0,621371	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23		0,621371	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03	**45,72835504**	0,621371	mixing truck

Concreto Betuminoso Usinado à Quente – CBUQ Convencional

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	39	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84	5	0,621371	tanker truck
	Cement	1,27		0,621371	barge
	Concrete Additives	0,84		0,621371	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84			
	Steel Reinforcing Bars	0,24		0	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**43,94711192**	0,621371	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		0	mixing truck

CBUQ com adição de 2% em volume de Borracha

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	36	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84	5	0,621371	tanker truck
	Cement	1,27		0	barge
	Concrete Additives	0,84		0	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	2,197355596	0,621371	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84			
	Steel Reinforcing Bars	0,24		0	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**43,94711192**	0	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		0	mixing truck

CBUQ com adição de 3% em volume de Borracha

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	35	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84	5	0,621371	tanker truck
	Cement	1,27		0	barge
	Concrete Additives	0,84		0	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	3,296033394	0,621371	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84			
	Steel Reinforcing Bars	0,24		0	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**43,94711192**	0	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		0	mixing truck

Camada Porosa de Atrito – CPA

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	31	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84	5	0,621371	tanker truck
	Cement	1,27		0	barge
	Concrete Additives	0,84		0	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84			
	Steel Reinforcing Bars	0,24		0	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**36,62259327**	0,621371	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		0	mixing truck

Stone Mastic Asphalt – SMA

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	Virgin Aggregate	2,23	37	0,621371	dump truck
	Bitumen	0,84	7	0,621371	tanker truck
	Cement	1,27		0	barge
	Concrete Additives	0,84		0	tanker truck
	RAP	1,85	0	0	dump truck
	FRAP	1,85	0	0	dump truck
	RAS	1,12	0	0	dump truck
	RCA	1,88	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Water	0,84			
	Steel Reinforcing Bars	0,24		0	dump truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**43,94711192**	0,621371	dump truck
	Total: Ready-mix concrete mix to site	2,03		0	mixing truck

Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC com 6% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	3	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	43	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

BGTC com 5% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	2	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	43	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

Brita Graduada Melhorada com Cimento – BGMC com 3% de cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	1	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	44	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

BGMC com 1% de cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	45	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

Brita Graduada Simples – BGS

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	46	0,621371	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

Solo-Brita

	Material	Density [tons/(yd^3)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd^3]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	29	0,621371	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	16	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,45**	**46**		

Solo-Brita-Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	2	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	29	0,621371	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	14	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,43**	**46**		

Rachão

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	46	0,621371	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	2,15	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0	dump truck
	Total: Subbase 2 materials to site	**2,00**	**46**		

Solo

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	0	0	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	46	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,63**	**46**		

Solo Melhorado com Cimento – SMC com 3% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	1	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	44	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,62**	**46**		

SMC com 6% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	3	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	43	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,61**	**46**		

Solo-Cimento - SC com 9% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	4	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	42	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,60**	**46**		

SC com 12% de Cimento

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	5	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	0	0	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	40	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,59**	**46**		

Concreto Compactado com Rolo – CCR

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Materials	RAP to recycling plant	1,85	0	0	dump truck
	RAP from recycling plant to site	1,85	0	0	dump truck
	RAS to recycling plant	1,12	0	0	dump truck
	RAS from recycling plant to site	1,12	0	0	dump truck
	RCM to recycling plant	1,88	0	0	dump truck
	RCM from recycling plant to site	1,88	0	0	dump truck
	Cement	1,27	2	0,621371	dump truck
	Coal Fly Ash	2,20	0	0	cement truck
	Coal Bottom Ash	2,00	0	0	dump truck
	Blast Furnace Slag	1,72	0	0	dump truck
	Foundry Sand	1,50	0	0	dump truck
	Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	0	0	dump truck
	Glass Cullet	1,93	0	0	dump truck
	Rock	2,00	0	0	dump truck
	Gravel	1,35	43	0,621371	dump truck
	Sand	1,25	0	0	dump truck
	Soil	1,63	0	0,621371	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**	**46**		

APÊNDICE B – SAÍDAS DO PROGRAMA ELSYM-5

Solução Base

```
          MODULO DE   COEF. DE
CAMADA     ELASTIC.   POISSON      ESPESSURA
          (KGF/CM2)                (CM)
  1        35000.     .350       10.000
  2         3000.     .400       15.000
  3         2000.     .350       40.000
  4          800.     .450     SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS........    2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO.....      5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO........      10.79 CM


      DISPOSICAO
,  CARGA   X(CM)    Y(CM)
   1     .000     .000
   2   28.800     .000


RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z=    .01   9.99  65.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X=  14.40
Y=    .00

 Z=    .01 CAMADA NO.  1
 X=      14.40
 Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX       -4.70
 SYY      -10.02
 SZZ        -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1       -.10
 PS 2      -4.70
 PS 3     -10.02
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .4958E+01
 PSS2  .2298E+01
 PSS3  .2660E+01
DESLOCAMENTOS
 UX    .0000E+00
 UY    .0000E+00
 UZ    .4160E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
 EXX  -.3304E-04
 EYY  -.2383E-03
 EZZ   .1442E-03
```

DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1442E-03
PE 2 -.3304E-04
PE 3 -.2383E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3825E-03
PSE2 .1773E-03
PSE3 .2052E-03

Z= 9.99 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX 2.48
SYY 8.03
SZZ -1.56
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 8.03
PS 2 2.48
PS 3 -1.56
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .4795E+01
PSS2 .2775E+01
PSS3 .2020E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4165E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .6151E-05
EYY .2202E-03
EZZ -.1497E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .2202E-03
PE 2 .6151E-05
PE 3 -.1497E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3699E-03
PSE2 .2141E-03
PSE3 .1559E-03

Z= 65.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.01

SYY .00
SZZ -.21
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 .00
PS 2 -.01
PS 3 -.21
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .1022E+00
PSS2 .3000E-02
PSS3 .9924E-01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2521E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .1072E-03
EYY .1181E-03
EZZ -.2525E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1181E-03
PE 2 .1072E-03
PE 3 -.2525E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3706E-03
PSE2 .1088E-04
PSE3 .3597E-03

Alternativa 1

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	23000.	.350	10.000
2	3000.	.400	15.000
3	2000.	.350	40.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

, CARGA	X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 9.99 65.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -3.05
SYY -7.74
SZZ -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.10
PS 2 -3.05
PS 3 -7.74
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .3817E+01
PSS2 .1473E+01
PSS3 .2344E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4355E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.1327E-04
EYY -.2884E-03
EZZ .1596E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1596E-03
PE 2 -.1327E-04
PE 3 -.2884E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .4481E-03
PSE2 .1729E-03
PSE3 .2752E-03

Z= 9.99 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX .81
SYY 5.57
SZZ -1.72
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00

TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 5.57
PS 2 .81
PS 3 -1.72
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .3643E+01
PSS2 .2382E+01
PSS3 .1261E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4361E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.2363E-04
EYY .2560E-03
EZZ -.1716E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .2560E-03
PE 2 -.2363E-04
PE 3 -.1716E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .4276E-03
PSE2 .2797E-03
PSE3 .1480E-03

Z= 65.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.01
SYY .00
SZZ -.22
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 .00
PS 2 -.01
PS 3 -.22
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .1075E+00
PSS2 .3368E-02
PSS3 .1041E+00
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2584E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .1122E-03
EYY .1244E-03
EZZ -.2652E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00

EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1244E-03
PE 2 .1122E-03
PE 3 -.2652E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3896E-03
PSE2 .1221E-04
PSE3 .3774E-03

Alternativa 2

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	2000.	.400	20.000
3	2000.	.350	40.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

CARGA	X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 9.99 70.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -5.34
SYY -11.11
SZZ -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.10
PS 2 -5.34
PS 3 -11.11
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .5505E+01
PSS2 .2617E+01

PSS3 .2887E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4403E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.4037E-04
EYY -.2631E-03
EZZ .1615E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1615E-03
PE 2 -.4037E-04
PE 3 -.2631E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .4246E-03
PSE2 .2019E-03
PSE3 .2227E-03

Z= 9.99 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX 3.65
SYY 9.82
SZZ -1.50
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 9.82
PS 2 3.65
PS 3 -1.50
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .5661E+01
PSS2 .3087E+01
PSS3 .2573E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4403E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .2100E-04
EYY .2592E-03
EZZ -.1775E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .2592E-03
PE 2 .2100E-04
PE 3 -.1775E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .4367E-03
PSE2 .2382E-03

PSE3 .1985E-03

Z= 70.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.01
SYY .00
SZZ -.20
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 .00
PS 2 -.01
PS 3 -.20
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .9705E-01
PSS2 .2603E-02
PSS3 .9445E-01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2466E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .1022E-03
EYY .1116E-03
EZZ -.2402E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1116E-03
PE 2 .1022E-03
PE 3 -.2402E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3518E-03
PSE2 .9437E-05
PSE3 .3424E-03

Alternativa 3

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	45000.	.250	15.000
3	2000.	.350	15.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

```
        DISPOSICAO
,   CARGA   X(CM)    Y(CM)
     1     .000     .000
     2   28.800     .000


   RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

    PROF.(S) - (CM)
    Z=    .01  24.99  40.01
    PONTO(S) X-Y - (CM)
    X=  14.40
    Y=    .00

     Z=    .01 CAMADA NO.  1
     X=      14.40
     Y=        .00
   TENSOES NORMAIS
    SXX       -2.78
    SYY       -4.72
    SZZ        -.10
   TENSOES DE CISALHAMENTO
    SXY   .0000E+00
    SXZ   .0000E+00
    SYZ   .0000E+00
   TENSOES PRINCIPAIS
    PS 1       -.10
    PS 2      -2.78
    PS 3      -4.72
   TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
    PSS1  .2306E+01
    PSS2  .1339E+01
    PSS3  .9668E+00
   DESLOCAMENTOS
    UX    .0000E+00
    UY    .0000E+00
    UZ    .2913E-01
   DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
    EXX  -.3129E-04
    EYY  -.1059E-03
    EZZ   .7200E-04
   DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
    EXY   .0000E+00
    EXZ   .0000E+00
    EYZ   .0000E+00
   DEF.ESP.PRINCIPAIS
    PE 1  .7200E-04
    PE 2 -.3129E-04
    PE 3 -.1059E-03
   DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
    PSE1  .1779E-03
    PSE2  .1033E-03
    PSE3  .7458E-04

     Z=  24.99 CAMADA NO.  2
     X=      14.40
     Y=        .00
   TENSOES NORMAIS
    SXX        4.20
    SYY        5.41
```

SZZ -.35
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 5.41
PS 2 4.20
PS 3 -.35
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2883E+01
PSS2 .6081E+00
PSS3 .2275E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2899E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .6516E-04
EYY .9894E-04
EZZ -.6121E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .9894E-04
PE 2 .6516E-04
PE 3 -.6121E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1602E-03
PSE2 .3378E-04
PSE3 .1264E-03

Z= 40.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.04
SYY -.03
SZZ -.21
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.03
PS 2 -.04
PS 3 -.21
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .9277E-01
PSS2 .4343E-02
PSS3 .8843E-01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2634E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .9016E-04
EYY .1059E-03

EZZ -.2304E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1059E-03
PE 2 .9016E-04
PE 3 -.2304E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3363E-03
PSE2 .1574E-04
PSE3 .3206E-03

Alternativa 4

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	75000.	.250	17.000
3	2000.	.350	15.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

CARGA	X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 26.99 42.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -2.02
SYY -3.52
SZZ -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.10
PS 2 -2.02

PS 3 -3.52
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .1708E+01
PSS2 .9591E+00
PSS3 .7489E+00
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2521E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.2154E-04
EYY -.7931E-04
EZZ .5245E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .5245E-04
PE 2 -.2154E-04
PE 3 -.7931E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1318E-03
PSE2 .7399E-04
PSE3 .5777E-04

Z= 26.99 CAMADA NO. 2
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX 4.97
SYY 6.15
SZZ -.25
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 6.15
PS 2 4.97
PS 3 -.25
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .3202E+01
PSS2 .5915E+00
PSS3 .2610E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2521E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .4656E-04
EYY .6628E-04
EZZ -.4045E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .6628E-04
PE 2 .4656E-04

PE 3 -.4045E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1067E-03
PSE2 .1972E-04
PSE3 .8701E-04

Z= 42.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.03
SYY -.03
SZZ -.16
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.03
PS 2 -.03
PS 3 -.16
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .6737E-01
PSS2 .2688E-02
PSS3 .6468E-01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2329E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .6550E-04
EYY .7524E-04
EZZ -.1690E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .7524E-04
PE 2 .6550E-04
PE 3 -.1690E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2442E-03
PSE2 .9743E-05
PSE3 .2345E-03

Alternativa 5

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	3000.	.400	15.000
3	1500.	.400	45.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

CARGA	X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 9.99 70.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -5.29
SYY -10.69
SZZ -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.10
PS 2 -5.29
PS 3 -10.69
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .5294E+01
PSS2 .2595E+01
PSS3 .2699E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .4477E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.4330E-04
EYY -.2515E-03
EZZ .1569E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1569E-03
PE 2 -.4330E-04
PE 3 -.2515E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .4084E-03
PSE2 .2002E-03
PSE3 .2082E-03

Z= 9.99 CAMADA NO. 1

```
  X=      14.40
  Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX        3.01
 SYY        8.60
 SZZ       -1.49
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1       8.60
 PS 2       3.01
 PS 3      -1.49
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .5049E+01
 PSS2  .2797E+01
 PSS3  .2252E+01
DESLOCAMENTOS
 UX    .0000E+00
 UY    .0000E+00
 UZ    .4484E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
 EXX   .1489E-04
 EYY   .2307E-03
 EZZ  -.1588E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
 EXY   .0000E+00
 EXZ   .0000E+00
 EYZ   .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
 PE 1  .2307E-03
 PE 2  .1489E-04
 PE 3 -.1588E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
 PSE1  .3895E-03
 PSE2  .2158E-03
 PSE3  .1737E-03

  Z=  70.01 CAMADA NO.  4
  X=      14.40
  Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX        -.01
 SYY         .00
 SZZ        -.20
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1        .00
 PS 2       -.01
 PS 3       -.20
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .9794E-01
 PSS2  .2465E-02
 PSS3  .9547E-01
DESLOCAMENTOS
 UX    .0000E+00
```

UY .0000E+00
UZ .2496E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .1037E-03
EYY .1127E-03
EZZ -.2423E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1127E-03
PE 2 .1037E-03
PE 3 -.2423E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3550E-03
PSE2 .8937E-05
PSE3 .3461E-03

Alternativa 6

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	3000.	.400	15.000
3	45000.	.350	15.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

CARGA	DISPOSICAO X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 9.99 39.99 40.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -2.54
SYY -7.44
SZZ -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00

SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.10
PS 2 -2.54
PS 3 -7.44
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .3670E+01
PSS2 .1217E+01
PSS3 .2452E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .3242E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .2932E-05
EYY -.1862E-03
EZZ .9685E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .9685E-04
PE 2 .2932E-05
PE 3 -.1862E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2831E-03
PSE2 .9392E-04
PSE3 .1892E-03

Z= 9.99 CAMADA NO. 1
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX .29
SYY 5.61
SZZ -1.91
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 5.61
PS 2 .29
PS 3 -1.91
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .3762E+01
PSS2 .2660E+01
PSS3 .1101E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .3242E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.2870E-04
EYY .1765E-03
EZZ -.1136E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00

EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1765E-03
PE 2 -.2870E-04
PE 3 -.1136E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2902E-03
PSE2 .2052E-03
PSE3 .8494E-04

Z= 39.99 CAMADA NO. 3
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX 4.47
SYY 4.91
SZZ -.24
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 4.91
PS 2 4.47
PS 3 -.24
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2577E+01
PSS2 .2230E+00
PSS3 .2354E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2687E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .6294E-04
EYY .7632E-04
EZZ -.7830E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .7632E-04
PE 2 .6294E-04
PE 3 -.7830E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1546E-03
PSE2 .1338E-04
PSE3 .1412E-03

Z= 40.01 CAMADA NO. 4
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.10
SYY -.09
SZZ -.24
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00

SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.09
PS 2 -.10
PS 3 -.24
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .7432E-01
PSS2 .3695E-02
PSS3 .7062E-01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2687E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .6302E-04
EYY .7642E-04
EZZ -.1930E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .7642E-04
PE 2 .6302E-04
PE 3 -.1930E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2694E-03
PSE2 .1339E-04
PSE3 .2560E-03

Alternativa 7

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.350	10.000
2	3000.	.400	15.000
3	75000.	.350	17.000
4	800.	.450	SEMI-INFINITO

DOIS CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

CARGA	X(CM)	Y(CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
Z= .01 9.99 41.99 42.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= 14.40
Y= .00

```
  Z=    .01 CAMADA NO.  1
  X=      14.40
  Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX       -1.88
 SYY       -6.72
 SZZ        -.10
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1       -.10
 PS 2      -1.88
 PS 3      -6.72
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .3310E+01
 PSS2  .8890E+00
 PSS3  .2421E+01
DESLOCAMENTOS
 UX    .0000E+00
 UY    .0000E+00
 UZ    .2945E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
 EXX   .1451E-04
 EYY  -.1723E-03
 EZZ   .8309E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
 EXY   .0000E+00
 EXZ   .0000E+00
 EYZ   .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
 PE 1  .8309E-04
 PE 2  .1451E-04
 PE 3 -.1723E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
 PSE1  .2553E-03
 PSE2  .6858E-04
 PSE3  .1868E-03

  Z=   9.99 CAMADA NO.  1
  X=      14.40
  Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX         .01
 SYY        5.31
 SZZ       -1.98
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1       5.31
 PS 2        .01
 PS 3      -1.98
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .3647E+01
 PSS2  .2649E+01
 PSS3  .9986E+00
```

DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2940E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.3289E-04
EYY .1714E-03
EZZ -.1099E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1714E-03
PE 2 -.3289E-04
PE 3 -.1099E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2814E-03
PSE2 .2043E-03
PSE3 .7704E-04

Z= 41.99 CAMADA NO. 3
X= 14.40
Y= .00
TENSOES NORMAIS
SXX 5.29
SYY 5.73
SZZ -.18
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00
SXZ .0000E+00
SYZ .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 5.73
PS 2 5.29
PS 3 -.18
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2954E+01
PSS2 .2191E+00
PSS3 .2735E+01
DESLOCAMENTOS
UX .0000E+00
UY .0000E+00
UZ .2373E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .4464E-04
EYY .5253E-04
EZZ -.5383E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00
EXZ .0000E+00
EYZ .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .5253E-04
PE 2 .4464E-04
PE 3 -.5383E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1064E-03
PSE2 .7887E-05
PSE3 .9847E-04

```
  Z=  42.01 CAMADA NO.  4
  X=      14.40
  Y=        .00
TENSOES NORMAIS
 SXX        -.08
 SYY        -.08
 SZZ        -.18
TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY   .0000E+00
 SXZ   .0000E+00
 SYZ   .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1       -.08
 PS 2       -.08
 PS 3       -.18
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1  .5297E-01
 PSS2  .2178E-02
 PSS3  .5079E-01
DESLOCAMENTOS
 UX    .0000E+00
 UY    .0000E+00
 UZ    .2372E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
 EXX   .4470E-04
 EYY   .5259E-04
 EZZ  -.1394E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
 EXY   .0000E+00
 EXZ   .0000E+00
 EYZ   .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
 PE 1  .5259E-04
 PE 2  .4470E-04
 PE 3 -.1394E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
 PSE1  .1920E-03
 PSE2  .7895E-05
 PSE3  .1841E-03
```

APÊNDICE C – VOLUMES DE MATERIAL INSERIDOS NO PALATE PARA O ESTUDO DE CASO – METODOLOGIA 1

Solução Base

	Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
			Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
	Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
	Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
	Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Gravel	1,35		687	0	dump truck
	Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**		**687**		dump truck
Subbase	Gravel	1,35		1172	0	dump truck
	Soil	1,63		659	0	dump truck
	Total: Subbase 2 materials to site	**1,45**		**1831**		

Alternativa 1

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	153		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	9		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	230		0	dump truck
		Bitumen	0,84	36		0	tanker truck
		Recycled Tires/ Crumb Rubber	1,92	13		0	dump truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materi	Gravel	1,35		687	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**		**687**		dump truck
Subbase	Materials	Gravel	1,35		1172	0	dump truck
		Soil	1,63		659	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,45**		**1831**		

Alternativa 2

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materials	Gravel	1,35		586	0	dump truck
		Soil	1,63		330	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,45**		**916**		
Subbase	Materials	Gravel	1,35		1172	0	dump truck
		Soil	1,63		659	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,45**		**1831**		

Alternativa 3

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materials	Cement	1,27		35	0	dump truck
		Gravel	1,35		439	0	dump truck
		Soil	1,63		212	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,43**		**687**		
Subbase	Materials	Gravel	1,35		439	0	dump truck
		Soil	1,63		247	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,45**		**687**		

Alternativa 4

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materi	Gravel	1,35		738	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**		**778**		dump truck
Subbase	Materials	Gravel	1,35		439	0	dump truck
		Soil	1,63		247	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,45**		**687**		

Alternativa 5

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materi	Gravel	1,35		687	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**		**687**		dump truck
Sub base	Materi	Rock	2,00		2060	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**2,00**		**2060**		dump truck

Alternativa 6

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materials	Gravel	1,35		687	0	dump truck
		Soil	1,63		212	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,42**		**899**		
Subbase	Materials	Cement	1,27		35	0	dump truck
		Gravel	1,35		439	0	dump truck
		Soil	1,63		212	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,43**		**687**		

Alternativa 7

		Material	Density [tons/(yd³)]	New Asphalt Pavement	New Subbase & Embankment Construction	Transportation	
				Volume [yd³]	Volume [yd³]	One-way transport distance [mi]	Transportation mode
Wearing Course 1	Materials	Virgin Aggregate	2,23	162		0	dump truck
		Bitumen	0,84	22		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**183,8759369**		0	dump truck
Wearing Course 2	Materials	Virgin Aggregate	2,23	246		0	dump truck
		Bitumen	0,84	33		0	tanker truck
		Total: Asphalt mix to site	1,23	**278,4843023**		0	dump truck
Base	Materi	Gravel	1,35		687	0	dump truck
		Total: Subbase 1 materials to site	**1,35**		**726**		dump truck
Subbase	Materials	Cement	1,27		40	0	dump truck
		Gravel	1,35		738	0	dump truck
		Total: Subbase 2 materials to site	**1,35**		**778**		dump truck

APÊNDICE D – DADOS METODOLOGIA 3 DO ESTUDO DE CASO

APÊNDICE E – RESULTADOS DA REGRESSÃO NÃO LINEAR

Pavimento Flexível

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,962914825
R-Quadrado	0,927204959
R-quadrado ajustado	0,927149742
Erro padrão	0,082130967
Observações	3959

ANOVA

	gl	*SQ*	*MQ*	*F*	*F de significação*
Regressão	3	339,8085572	113,2695191	16791,87472	0
Resíduo	3955	26,67843557	0,006745496		
Total	3958	366,4869927			

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*	*Inferior 95,0%*	*Superior 95,0%*
Interseção	1,77317368	0,015986251	110,918671	0	1,741831613	1,804515747	1,741831613	1,804515747
log(N)	-0,728636427	0,03091222	-23,57114526	4,638E-115	-0,789241812	-0,668031042	-0,789241812	-0,668031042
CBR	0,037279294	0,006339599	5,880386804	4,43153E-09	0,024850105	0,049708484	0,024850105	0,049708484
SN	1,34292989	0,011475471	117,0261207	0	1,320431494	1,365428286	1,320431494	1,365428286

Pavimento Semirrígido

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,979195949
R-Quadrado	0,958824706
R-quadrado ajustado	0,958823248
Erro padrão	0,041606335
Observações	84730

ANOVA

	gl	*SQ*	*MQ*	*F*	*F de significação*
Regressão	3	3415,372942	1138,457647	657654,7345	0
Resíduo	84726	146,6680882	0,001731087		
Total	84729	3562,04103			

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*	*Inferior 95,0%*	*Superior 95,0%*
Interseção	1,68603028	0,003384033	498,2310584	0	1,679397603	1,692662957	1,679397603	1,692662957
log(N)	-0,203920633	0,004832534	-42,19745166	0	-0,213392362	-0,194448905	-0,213392362	-0,194448905
CBR	0,00955107	0,000798986	11,9539856	6,57787E-33	0,007985064	0,011117077	0,007985064	0,011117077
SN	0,991609429	0,000954339	1039,053519	0	0,989738932	0,993479926	0,989738932	0,993479926

Pavimento Invertido

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,996432815
R-Quadrado	0,992878356
R-quadrado ajustado	0,992878206
Erro padrão	0,020000642
Observações	142305

ANOVA

	gl	*SQ*	*MQ*	*F*	*F de significação*
Regressão	3	7936,181867	2645,393956	6613060,084	0
Resíduo	142301	56,92405641	0,000400026		
Total	142304	7993,105923			

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*	*Inferior 95,0%*	*Superior 95,0%*
Interseção	1,540200105	0,000653936	2355,275842	0	1,538918403	1,541481808	1,538918403	1,541481808
log(N)	-0,042513528	0,000867805	-48,98974716	0	-0,044214408	-0,040812648	-0,044214408	-0,040812648
CBR	0,002652384	0,000203976	13,00339111	1,23133E-38	0,002252594	0,003052173	0,002252594	0,003052173
SN	1,029710546	0,000273153	3769,721218	0	1,029175171	1,03024592	1,029175171	1,03024592

ANEXO A – ÁBACOS PARA OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE CAMADA

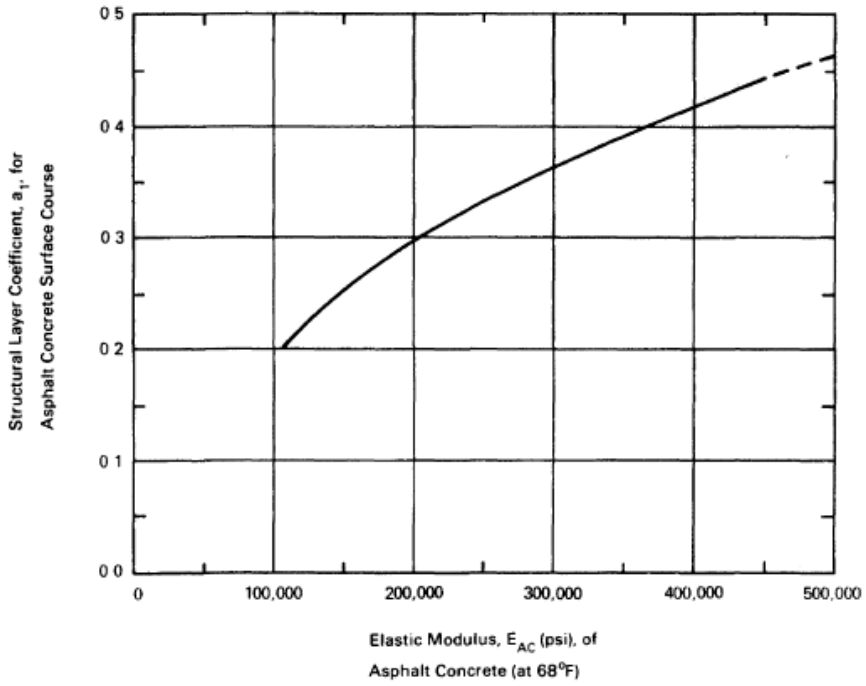
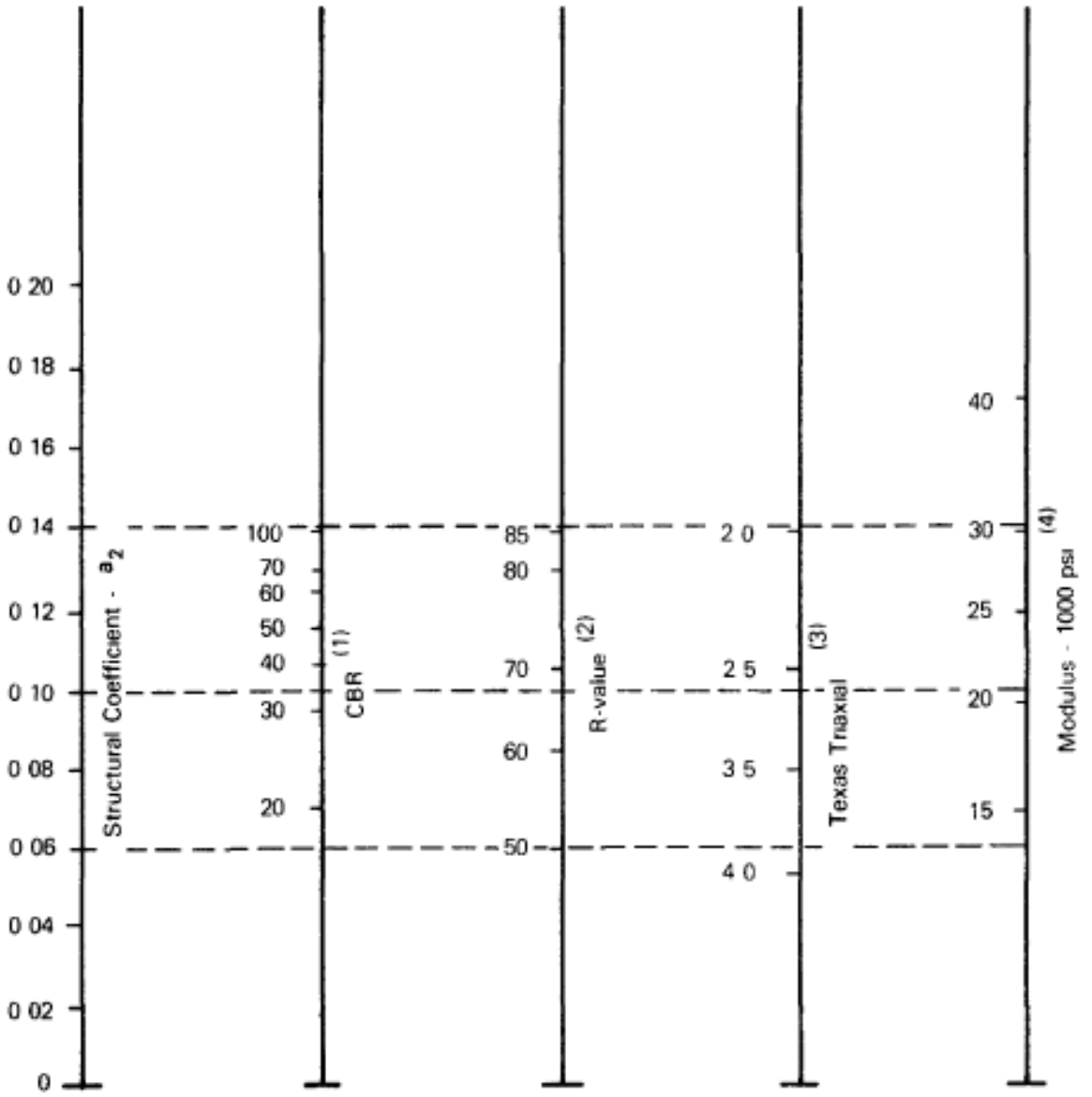
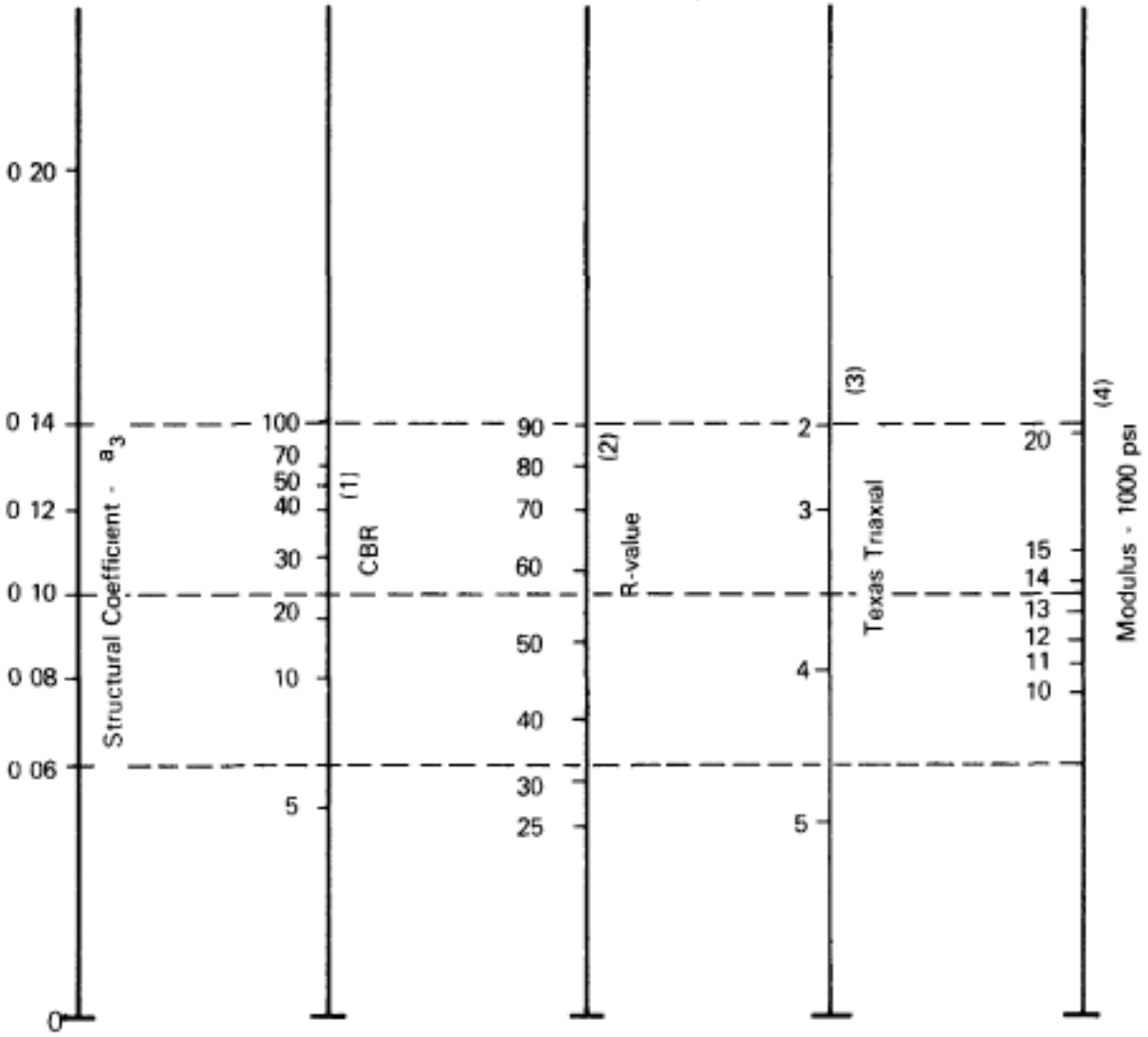


Figura A.1 – Ábaco para determinação do coeficiente de camada do revestimento "a_1" (AASHTO, 1993)



(1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
(2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
(3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
(4) Scale derived on NCHRP project *(3)*

Figura A.2 – Ábaco para determinação do coeficiente de camada de base "a_2" (AASHTO, 1993)



(1) Scale derived from correlations from Illinois

(2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming

(3) Scale derived from correlations obtained from Texas

(4) Scale derived on NCHRP project *(3)*

Figura A.3 – Ábaco para determinação do coeficiente de camada de sub-base "a_3" (AASHTO, 1993)

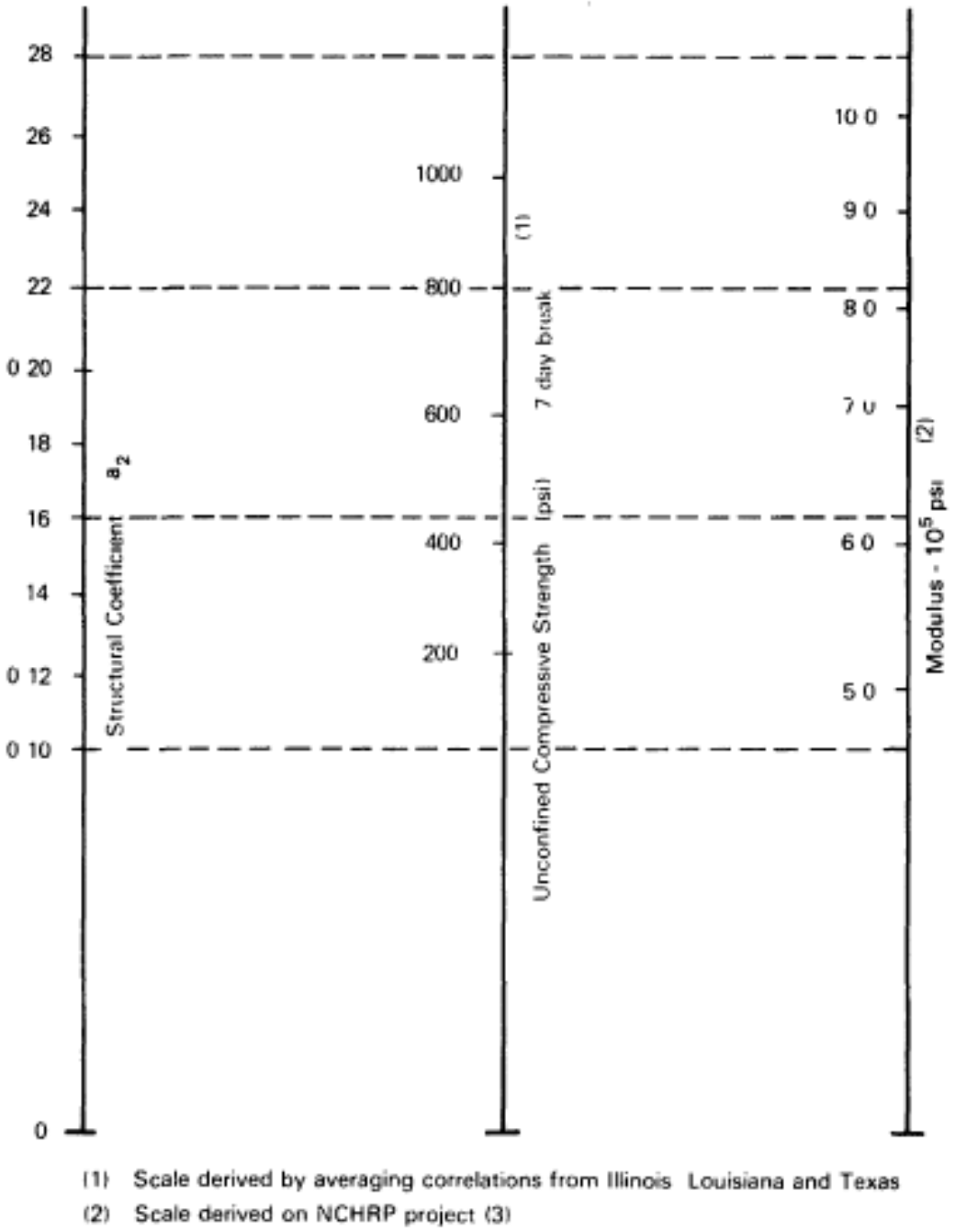


Figura A.4 – Ábaco para determinação do coeficiente de camadas estabilizadas com cimento (AASHTO, 1993)