LUCIANA DE PAULA SOUZA

**USO INTEGRADO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA
E DE ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA EM PAVIMENTAÇÃO**

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

São Paulo
2017

LUCIANA DE PAULA SOUZA

**USO INTEGRADO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA
E DE ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA EM PAVIMENTAÇÃO**

Orientador: Profa. Dra. Rosângela
dos Santos Motta

Departamento de Engenharia de
Transportes

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

São Paulo

2017

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Souza, Luciana de Paula

Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação / L. P. Souza -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

162 p.

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

1.pavimentação asfáltica 2.pavimentação de concreto 3.ciclo de vida 4.ciclo de vida [custos] 5.sustentabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

À Deus,

Autor e consumidor da minha vida

que pela sua infinita bondade

tem cuidado de mim.

AGRADECIMENTOS

À todos que de alguma forma me apoiaram e colaboraram com a produção deste trabalho ao longo desses anos.

À minha querida e admirável professora e orientadora Dra. Rosângela, por toda oportunidade e incentivo durante toda essa fase de desenvolvimento intelectual; obrigada Rô por toda a confiança dispensada.

À toda minha ótima, linda e amada família à qual faltam palavras para descrever, e em especial ao meu esposo Isaías e minha filha Sara, meus companheiros, amigos e maiores incentivadores. Amo vocês!

À minha mãe Dilva (*in memorian*), que sempre me incentivou a seguir em frente mesmo quando todos os recursos pareciam impossíveis. Te amo mãe. Saudades.

À professora Dra. Liedi e professor Dr. Suzuki pelas informações e experiências prestadas durante o curso. Obrigada pela riqueza em conhecimentos que nos oferecem. Aos professores da banca da qualificação professor Dr. Balbo e professor Dr. Caio por todas as apreciações construtivas que muito me ajudaram na constituição desse trabalho.

Aos meus amigos da Concremat Engenharia e Tecnologia, que me deram todo o apoio necessário para a conclusão desse trabalho; aos meus amigos Leandro Madi e Paulo Belisário pelo auxílio e toda ajuda dispensada; a minha amiga Laudely pelo apoio e incentivo; à minha gerente Beth Petroni, que acreditou que esse sonho seria possível. Muito obrigada!

À banca examinadora professora Dra. Laura e professor Dr. Caio, por todas as contribuições para o desenvolvimento e melhoramento desse trabalho.

À Deus por ter me amparado até aqui e revigorado as minhas forças em todos os momentos. Me guiou, orientou, por fim, me capacitou tornando possível a realização deste sonho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo	8
1.2. Estrutura da dissertação	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Análise de Ciclo de Vida (LCA)	10
2.2. LCA na pavimentação	16
2.3. Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA)	20
2.4. LCCA na pavimentação	21
2.5. A integração LCA-LCCA	24
3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	26
3.1. Descrição dos pavimentos propostos.....	26
3.2. Estratégias de restauração e conservação periódica dos pavimentos	35
3.3. Metodologia do trabalho.....	44
3.3.1. Definição dos pavimentos a serem analisados.....	45
3.3.2. Metodologia LCA	46
3.3.3. Metodologia LCCA.....	49
3.3.4. Integração LCA-LCCA	53
3.4. Análise do ciclo de vida (LCA).....	57
3.4.1. Definição de objetivo e escopo da LCA	57
3.4.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV).....	57
3.4.3. Princípios de cálculo.....	66
3.4.3.1. Módulo 1 – Produção das matérias-primas.....	67
3.4.3.2. Módulo 2 – Equipamentos e construção	72
3.4.3.3. Módulo 3 – Distância de transporte.....	79
3.4.3.4. Módulo 4 – Congestionamentos ou atrasos aos usuários.....	83
3.4.3.5. Módulo 5 – Operação e uso da rodovia	84
3.4.4. Análise de impacto do ciclo de vida (AICV)	89
3.4.4.1. Consumo de energia primária	89
3.4.4.2. Potencial de aquecimento global	90
3.4.4.3. Emissões de poluentes atmosféricos e da água	94
3.5. Análise de custo do ciclo de vida (LCCA)	95
3.5.1. Custos à administração rodoviária.....	95
3.5.1.1. Custos iniciais de construção.....	95
3.5.1.2. Custos de conservação.....	96

3.5.2. Custos aos usuários	98
3.5.2.1. Estimativa do custo do tempo do usuário.....	98
3.5.2.2. Consumo adicional de combustível devido ao aumento da irregularidade longitudinal	100
3.5.2.3. Custo devido ao risco de acidentes	102
3.5.3. Cálculo do valor presente líquido.....	103
3.5.4. Análise comparativa dos resultados	104
3.6. Integração LCA-LCCA.....	107
3.7. Aplicação do método multicritério AHP	108
4. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....	113
5. RECOMENDAÇÃO PARA trabalhos futuros	117
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
ANEXO A – Planilha de dimensões geométricas dos pavimentos avaliados	130
ANEXO B – Planilha de quantidades para a construção do pavimento novo.....	132
ANEXO C – Planilha de quantidades para a conservação periódica e restauração do pavimento.....	140
ANEXO D – LCA - Módulo 1 – Quantidade de energia primária e emissões para produção das matérias-primas	145
ANEXO E – LCA - Módulo 2 – Quantidade de energia primária e emissões para construção, conservação e restauração.....	148
ANEXO F – LCA - Módulo 3 – Quantidade de energia primária e emissões para transporte	150
ANEXO G – LCA - Módulo 5 – Operação e uso da rodovia	152
ANEXO H – Dados de saída obtidos do simapro	155
ANEXO I – AICV – Análise de inventário do ciclo de vida.....	157
ANEXO J – LCCA – Cálculo dos custos aos usuários	158
ANEXO K – LCCA – Cálculo do valor presente líquido.....	160
ANEXO L – Integração – Avaliação multicritério AHP	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma LCA	12
Figura 2 - Ciclo de vida genérica de um sistema de produção LCA.....	13
Figura 3 - Consumo de combustível x Velocidade	19
Figura 4 - Modelo LCA-LCCA integrado.....	25
Figura 5 – Pavimento Tipo A – Estrutura flexível com revestimento asfáltico	28
Figura 6 – Pavimento Tipo B – Estrutura semirrígida invertida com revestimento asfáltico	30
Figura 7 - Pavimento Tipo C – Estrutura rígida revestimento em concreto de cimento Portland.....	31
Figura 8 – Relação entre componentes de uma análise LCA	46
Figura 9 - Hierarquia de critérios AHP empregada na presente pesquisa.....	54
Figura 10 - Metodologia de desenvolvimento do presente trabalho	56
Figura 11 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo A	58
Figura 12 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo B	61
Figura 13 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo C	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas de desempenho - QI/IRI – Pavimento Tipo A.....	39
Gráfico 2 - Curvas de desempenho - %FC2+FC3 – Pavimento Tipo A.....	39
Gráfico 3 - Curvas de desempenho - QI/IRI – Pavimento Tipo B.....	41
Gráfico 4 - Curvas de desempenho - %FC2+FC3 – Pavimento Tipo B.....	41
Gráfico 5 - Energia primária consumida por cada tipo de pavimento (TJ).....	89
Gráfico 6 – Impacto de aquecimento global em função das emissões de CO ₂ equivalente.....	92
Gráfico 7 - Emissões de partículas, DBO e DQO.....	94
Gráfico 8 – Custo total do ciclo de vida para as três alternativas estudadas.....	105
Gráfico 9 – Valor presente líquido para as três alternativas analisadas.....	107
Gráfico 10 – Aspecto econômico x Aspecto ambiental	108
Gráfico 11 – Análise das prioridades.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de dimensionamento – Pavimento Tipo A	28
Tabela 2 - Resultados dos esforços solicitantes – Pavimento Tipo A	29
Tabela 3 - Parâmetros de dimensionamento – Pavimento Tipo B	30
Tabela 4 - Resultados esforços solicitantes – Pavimento Tipo B	31
Tabela 5 - Estrutura proposta – Pavimento Tipo C	33
Tabela 6 - Estruturas de pavimentos propostas	35
Tabela 7 - Cálculo do número estrutural do pavimento Tipo A.....	37
Tabela 8- Soluções de restauração – Pavimento Tipo A.....	38
Tabela 9 - Conservação periódica - Pavimento Tipo A e Tipo B	38
Tabela 10 - Cálculo do número estrutural do pavimento Tipo B.....	40
Tabela 11 - Soluções de restauração – Pavimento Tipo B.....	40
Tabela 12 - Conservação periódica - Pavimento Tipo C	42
Tabela 13 - Soluções de restauração - Pavimento Tipo C	43
Tabela 14 - Resumo das soluções de conservação periódica e restauração para pavimentos propostos	43
Tabela 15 – Quantidades de serviços para construção inicial.....	66
Tabela 16 - Quantidades de serviços para serviços de conservação periódica e restauração dos pavimentos	67
Tabela 17 - Quantidades de matérias-primas para cada pavimento analisado.....	68
Tabela 18 - Quantidades de energia primária consumida por tipo de pavimento.....	69
Tabela 19 - Quantidades de emissões de GEE para matérias-primas.....	71
Tabela 20 - Quantidades de horas de equipamentos na construção	73
Tabela 21 - Quantidade de energia primária consumida por equipamentos na construção.....	75
Tabela 22 - Emissões referentes ao uso de equipamentos na construção	77
Tabela 23 - Distância média de transporte para os serviços considerados.....	80
Tabela 24 - Quantidades de horas de caminhões para transporte de materiais para bota-fora e construção da rodovia.....	81
Tabela 25 - Quantidade de energia primária consumida para serviços de transporte	81
Tabela 26 - Quantidades de emissões para transporte de materiais para bota-fora e construção da rodovia	82
Tabela 27 – Período total de intervenção para cada alternativa	84
Tabela 28 - Aumento do consumo de combustível em função do aumento do IRI para veículos leves.....	85

Tabela 29 - Aumento do consumo de combustível mediante aumento do IRI para veículos pesados.....	86
Tabela 30 - Estimativa do consumo de combustível excedente para 20 anos	87
Tabela 31 - Acréscimo de emissões devido ao aumento do consumo de combustível pelo aumento do IRI para o período de 20 anos	88
Tabela 32 - Quantidades totais de emissões de GEE	91
Tabela 33 - Custos totais de construção inicial para as três alternativas de pavimento	96
Tabela 34 - Custo total para conservação e restauração dos pavimentos analisados	97
Tabela 35 - Progressão do VDM ano a ano	99
Tabela 36 - Estimativa de custo do tempo para os usuários – Veículos leves	100
Tabela 37 - Estimativa de custo do tempo para os usuários – Veículos pesados...	100
Tabela 38 - Custo do aumento do consumo de combustível por evolução do IRI...	101
Tabela 39 - Custo devido ao risco de acidentes.....	102
Tabela 40 – Custo total relacionado aos usuários da rodovia	103
Tabela 41 - Valor presente líquido para cada alternativa proposta	104
Tabela 42 - Matriz de prioridades	109
Tabela 43 – Aspectos e pesos calculados	110
Tabela 44 – Tabela comparativa de resultados.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AICV	Análise de impacto do ciclo de vida
ANORGS	Associação de Pesquisa, Educação e Proteção Ambiental do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
ANTP	Associação Nacional dos Transportes Públicos
ARTESP	Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CCR	Concreto compactado com rolo
CDOT	<i>Colorado Department of Transportation</i>
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
COV	Compostos orgânicos voláteis
CP	Cimento Portland
CSI	CAMBRIDGE SYSTEMATICS, INC.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DMT	Distância média de transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>

FVA	Fator do valor atual
GEE	Gases de efeito estufa
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário do ciclo de vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life cycle analysis</i>
LCCA	<i>Life cycle cost analysis</i>
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PICR	Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Rodovias
QI	Coeficiente de irregularidade
SBCI	<i>Sustainable Buildings and Climate Initiative</i>
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SN	Número estrutural
SNC	Número estrutural corrigido
TVPL	Valor presente líquido total
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USDOT	<i>United States Department of Transportation</i>
USIRF	<i>French Road Builders Union</i>
VDM	Volume diário médio
VPL	Valor presente líquido
VR	Vida Remanescente
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔPSI	Perda de serventia de projeto
CH_4	Gás metano
cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de carbono
D	Deflexão na superfície [10^{-2} mm]
E	Módulo de elasticidade
ϵ_t	Deformação horizontal de tração
ϵ_v	Deformação vertical de compressão
$\varnothing$	Diâmetro da barra de transferência
GC	Grau de compactação
K	Coeficiente de equivalência estrutural
k	Módulo de reação do subleito
kgf	Quilograma força
kgf/cm^2	Quilograma força por centímetro quadrado
km/h	Quilômetro por hora
km/L	Quilômetro por litro
kN	Quilo Newton
lb	Libra
MJ	Mega Joules
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Número de solicitações do eixo padrão de 80 KN
N_2O	Ácido nitroso
PI	Proctor Intermediário
P_i	Índice de Serventia Inicial
PN	Proctor Normal
P_t	Índice de Serventia Final
tf	Tonelada força
μ	Coeficiente de Poisson
σ_t	Deformações horizontais de tração

RESUMO

A sustentabilidade pode ser uma realidade para a concepção e construção de uma rodovia, especialmente quanto ao pavimento. Dentro deste contexto, a análise do ciclo de vida – *LCA (Life Cycle Analysis)* e a análise do custo do ciclo de vida – *LCCA (Life Cycle Cost Analysis)* dos pavimentos são formas de prover meios para avaliar aspectos relativos à sustentabilidade de uma solução de pavimentação, seja no setor ambiental ou econômico. Na pesquisa apresentada, essas ferramentas são utilizadas para identificar os compromissos em tomada de decisão, uma vez que permitem a apreciação de indicadores de sustentabilidade e viabilidade de investimento, a partir do momento da produção das matérias-primas, até implantação do pavimento, manutenção, conservação e uso da rodovia. Portanto, nessa pesquisa foram avaliadas e comparadas três estruturas típicas de pavimento (flexível, semirrígido e rígido) propostas para uma rodovia que se encontra em fase de implantação. Após verificação e comparação dos dados obtidos foi feita a integração desses resultados sob âmbito de sustentabilidade e viabilidade de implementação, através do método multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Tal integração permitiu uma avaliação analítica de indicadores, por meio da verificação das emissões de CO₂ equivalentes, e também através da constatação do VPL (valor presente líquido) para cada alternativa considerada. De maneira geral, sob as condições estabelecidas nesta pesquisa, os resultados permitiram observar, por exemplo, qual estrutura levaria a uma maior liberação de CO₂ na atmosfera e qual pavimento apresentaria viabilidade de investimento menos atrativa, o que poderia auxiliar na tomada de decisão quanto à estrutura a ser adotada naquele projeto.

ABSTRACT

Sustainability can be a reality for the design and construction of a highway, especially considering the pavement. Within this context, Life Cycle Analysis (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA) of pavements may provide means to evaluate aspects related to the sustainability of a solution, both in the environmental or economic sectors. In the presented research, these tools are used to identify the commitments in decision making, since they allow the evaluation of sustainability indicators and feasibility of investment, since production of raw materials, until the pavement construction, maintenance, conservation and highway operation. Therefore, in this research, three typical pavement structures (flexible, semi-rigid and rigid) were proposed and compared (undergoing project). After verification and comparison of the obtained data, the integration of LCA and LCCA under sustainability and feasibility aspects was done through the AHP (Analytic Hierarchy Process) multi-criteria method. This integration allowed an analytical evaluation of indicators, through the verification of the equivalent CO₂ emissions, and also through the verification of the NPV (net present value) for each alternative considered. In general, under the conditions established in this research, the results showed, for example, which structure would lead to a higher release of CO₂ into the atmosphere and which pavement would present less attractive investment feasibility, which could help in decision making of which pavement structure could be adopted in that project.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das atividades de maior pegada ecológica em nosso planeta¹, (TREVISAN, 2012). Dados da principal iniciativa entre os setores públicos e privados, o *Sustainable Buildings and Climate Initiative* (SBCI), entidade ligada ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA ou UNEP, em inglês). Segundo esse programa, a construção consome 40% de toda energia, extrai 30% dos materiais do meio natural, gera cerca de 40% dos resíduos sólidos dos centros urbanos, consome 25% da água e ocupa 12% das terras. Infelizmente, a construção também não fica atrás quando se trata de emissões atmosféricas, respondendo por mais de 30% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Na área de construção de infraestrutura de pavimentos, por exemplo, segundo a *Federal Highway Administration* (FHWA, 2007), o uso de materiais como concreto e asfalto apresentam efeitos e impactos significativos no meio ambiente.

Particularmente no caso do cimento (matéria-prima do concreto), este possui demanda anual da ordem de 3,6 bilhões de toneladas/ano e seu consumo deverá aumentar 2,5 vezes até 2050, puxado pelo crescimento dos países em desenvolvimento. Existem estudos que mostram que no futuro este setor poderá ser responsável por cerca de 20% do total de CO₂ emitido na atmosfera, caso não haja mudanças, considerando que atualmente essa emissão já corresponda a 5%. Ademais, deve-se ainda ressaltar a geração de outros poluentes em níveis significativos, como material particulado e óxidos de enxofre (ESTAKHRI e SAYLAK, 2005).

Já o asfalto (que é oriundo do petróleo), consome 7.613 MJ de energia/m³ de matéria-prima produzida (ATHENA INSTITUTE, 2006), além de ser também uma grande fonte de emissão de compostos orgânicos voláteis (COV's), representando 200.000 toneladas das emissões de COV's a cada ano nos Estados Unidos, na construção de pavimentos asfálticos (SPIVEY, 2000).

Deste modo, a implantação de um complexo viário pode acometer sérios impactos sobre o meio ambiente, não só desde a extração das matérias-primas, mas também

¹ A pegada ecológica é a medida da capacidade regenerativa da biosfera que é usada pelas atividades humanas (MORAN *et al.*, 2008).

com a geração de resíduos provenientes da reconstrução do pavimento, quando este não serve mais para a sua finalidade.

Embora a construção inicial da rodovia seja determinante para a tomada de decisão, esta é apenas uma parte da história, uma vez que a alternativa de pavimento selecionada comprometerá a agência rodoviária para decisões futuras de manutenção, reabilitação e demais ações ao longo do ciclo de vida do projeto. Além disso, a alternativa selecionada acumulará custos para os usuários que utilizarão a rodovia (USDOT, 2008).

O impacto econômico para a implantação de um sistema de pavimentos é outro tópico relevante. Uma obra rodoviária se caracteriza por ter custos consideráveis na concepção e execução. Após a conclusão da obra, também devem ser levados em conta os custos de conservação e restauração da infraestrutura, pois com o passar do tempo e o uso, os pavimentos se deterioram, necessitando de manutenção e reabilitação para passar a fornecer um alto nível de segurança e serviço (HUANG, 2004). Segundo o DNIT (2006b), a restauração de um pavimento envolve um conjunto de medidas destinadas a adaptar a rodovia, de uma forma permanente às condições de tráfego atuais e futuras, prolongando seu período de vida. Por outro lado, as atividades de conservação periódica são o conjunto de operações de conservação realizadas periodicamente com o objetivo de evitar surgimento ou agravamento de defeitos.

Sem conservação e restauração há uma rápida degradação dos pavimentos que são submetidos a um tráfego cada vez mais pesado e numeroso, o que tem reflexo imediato e compromete grande parte do orçamento dos organismos gestores rodoviários. Segundo Walls e Smith (1998), os fatores que determinam os custos de transporte têm sido amplamente discutidos e chega-se a um consenso de que esses custos são influenciados pela condição do pavimento.

Dentro deste contexto, a qualidade da superfície do pavimento em uma rodovia interfere no custo operacional da atividade transportadora. Assim, quando há degradação no pavimento, aumenta-se o gasto com combustível e manutenção dos veículos, além dos riscos de acidentes. Ademais, a má qualidade do pavimento

rodoviário interfere diretamente nas condições de trabalho e na qualidade de vida do trabalhador e usuário do transporte.

Em um estudo divulgado em 2013 pela FHWA, estima-se que rodovias americanas em condições inadequadas custem 25% a 30% a mais por milha para os usuários que nelas transitam, em comparação com rodovias com boas condições de pavimentação. Os custos totais desta estimativa incluem o aumento da depreciação e manutenção dos veículos, consumo de óleo lubrificante, consumo de pneus e, principalmente, consumo de combustível, somando-se ainda os custos ambientais inerentes à maior emissão de poluentes atmosféricos provenientes do aumento do consumo. Neste contexto, a expressiva quantidade de emissão de poluentes também se deve em grande parte pelo aumento nos tempos de viagem ou congestionamentos causados pela má qualidade da infraestrutura rodoviária.

Segundo a pesquisa CNT – Confederação Nacional dos Transportes (2015), a conservação periódica é um requisito imprescindível para a existência de um bom pavimento, tendo apontado que o país tem prejuízo anual de R\$ 3,8 bilhões somente com a exportação de soja e milho, devido às condições das rodovias, particularmente com relação à deficiência dos pavimentos, onde os defeitos e as irregularidades na condição da superfície impactam diretamente nos custos operacionais.

Além disso, a má condição da superfície de rolamento das rodovias, com a presença de afundamentos, ondulações e/ou buracos, contribui para a instabilidade do veículo. Consequentemente, traz dificuldade em mantê-lo na trajetória desejada, podendo, desse modo, gerar colisões, pela mudança brusca de direção e à perda do controle do veículo, causando o aumento do risco da ocorrência de acidentes.

Os critérios para seleção de uma solução para a pavimentação de uma rodovia baseiam-se no tráfego que será praticado e também nos custos de implantação, sendo, muitas vezes, desconsiderados os seus custos de conservação e restauração (COSTA, 2008). Adicionalmente, a solução só será efetivamente eficaz se transmitir uma clara vantagem de custo-benefício, levando-se em conta todos os fatores determinantes. A análise para definir o recurso adequado deve passar inevitavelmente pelos fatores ambiental, social e econômico, não se podendo descartar outros aspectos importantes, como durabilidade e custos acrescidos de conservação e

restauração, caso a alternativa adotada não seja sustentável no aspecto ambiental ou econômico. Assim, a escolha de uma solução de pavimento é exclusiva para cada caso, pois cada situação apresenta particularidades próprias. Dessa forma, a aplicação sistemática de determinada opção pode não ser sustentável ao longo do período de vida do pavimento, sendo necessário considerar um conjunto de fatores e avaliar de modo particular a relação custo-benefício de cada alternativa (SANTOS, 2011).

A produção da mistura asfáltica, por exemplo, requer uma quantidade significativa de energia para alimentação das usinas produtoras das misturas. As altas temperaturas necessárias liberam grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, causando impactos ambientais e sociais, mas, apesar disto, a mistura asfáltica continua a ser muito utilizada na infraestrutura rodoviária. Neste sentido, novas tecnologias têm sido desenvolvidas, como a redução das temperaturas da produção e compactação das misturas asfálticas, por meio das misturas mornas, diminuindo assim as emissões (MOTTA, 2011).

Por outro lado, é indispensável não somente reconhecer o impacto causado pela produção, mas também avaliar o desempenho do material resultante no campo. A durabilidade ou qualidade de um determinado material pode provar ser um aspecto mais importante do ponto de vista do ciclo de vida, do que o impacto causado pela produção da matéria-prima. Por isso, também é imprescindível visualizar o desempenho desse material depois de aplicado e durante a sua vida em serviço. Dentro deste contexto, entende-se que estender a vida de serviço de uma infraestrutura e reduzir os encargos de reparação e reconstrução é também uma forma de reduzir os impactos ambientais.

A infraestrutura de transportes promove a mobilidade de pessoas e bens, o que afeta as funções de cada sociedade. Todavia, o setor em que se insere é reconhecido como sendo um forte contribuinte para as emissões e o consumo de energia, tendo um impacto importante sobre as alterações climáticas e o padrão de vida da sociedade (ANWAR *et al.*, 2010).

No entanto, até o momento as discussões de sustentabilidade em matéria de emissões e de consumo de energia concentraram-se em emissões através da queima

e consumo de combustíveis e raramente a construção e restauração de pavimentos foram considerados como contribuintes (BAHIA e MILLER, 2012). A sustentabilidade ambiental está sendo cada vez mais adotada como uma realidade para a concepção e construção de um pavimento e não somente o aspecto econômico. Dentro deste contexto, a análise do ciclo de vida – LCA (*Life Cycle Analysis*) e a análise do custo do ciclo de vida – LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*) dos pavimentos são formas de avaliar parâmetros relativos à sustentabilidade de uma solução de pavimentação.

O conceito de sustentabilidade é complexo, pois atende a um conjunto de variáveis interdependentes, que deve ter a capacidade de integrar as questões sociais, energéticas, econômicas e ambientais. Na declaração de Joanesburgo que aconteceu durante a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável, da ONU (Organização das Nações Unidas), realizada na África do Sul, em 2010, estabeleceu-se que o desenvolvimento sustentável se baseia em três pilares: desenvolvimento econômico, desenvolvimento social e proteção ambiental (Nações Unidas, 2015).

Desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992 – a Cúpula da Terra – no Rio de Janeiro, o mundo identificou um novo caminho para o bem-estar humano, o do desenvolvimento sustentável. O conceito de desenvolvimento sustentável, apresentado na Agenda 21 (Plano de ação antipobreza), reconhece que o desenvolvimento econômico deve ser equilibrado com um crescimento que responda às necessidades das pessoas e proteja o meio ambiente (Nações Unidas, 2015).

Na pavimentação a sustentabilidade só é possível com pavimentos duráveis, onde o melhor desempenho operacional é a chave para alcançá-la. Neste sentido, o dimensionamento correto de espessuras de camadas de pavimento (incluindo dimensionamento mecânico), a seleção de materiais de acordo com o clima e o tráfego, a dosagem adequada de materiais e o processo construtivo podem conduzir à sustentabilidade. Dentro deste contexto um pavimento de longa vida é um tipo de pavimento que não sofrerá deterioração significativa na sua fundação ou nas camadas de base e sub-base, desde que a manutenção da camada superficial seja corretamente realizada (ELLPAG, 2004).

No manual da EAPA - *European Asphalt Pavement Association* (2007), chamado *Long-Life Asphalt Pavements - Technical Version*, são apresentados alguns componentes quantitativos importantes que foram identificados por pesquisadores para alcançar um bom desempenho ao longo da vida do pavimento. Este deve ser desenvolvido para um extenso período de projeto, com atividades de manutenção programadas e ocasionando baixo custo de atrasos de viagens para os usuários. Além disso, os critérios de projetos devem ser conservadores, considerando ainda camadas de rolamento resistentes ao desgaste e camadas de base resistentes à fadiga.

Tendo em vista a questão da sustentabilidade, há necessidade de normalização e legislação para implantação de técnicas, produtos e procedimentos. Nos EUA, por exemplo, tem-se no NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) 40-01 um guia de especificações de materiais reciclados e rejeitos, enquanto a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) já formou um subcomitê (D 04.99) para ensaios e especificações de sustentabilidade de pavimentos (LEITE, 2013).

Engenheiros e os tomadores de decisão estão cada vez mais conscientes das suas responsabilidades em relação à sustentabilidade. Além disso, as sociedades não podem continuar a utilizar a energia ao ritmo atual, levando-se em conta que entre os anos de 1950 e 2000 o mundo tem aumentado seu consumo de energia em 400% (NAKICENOVIC *et al.*, 2000).

O desenvolvimento e a adoção de tecnologias limpas são parte essencial na busca pelo desenvolvimento sustentável, onde o conceito de Tecnologia Limpa pode ser entendido como sendo um conjunto de soluções que viabilizem novos modelos de se pensar e de se usar os recursos naturais (MAZON, 1992).

De maneira prática, as tecnologias limpas são novos processos industriais ou alterações realizadas em processos já existentes, sempre com o objetivo de que o consumo de matérias-primas, o consumo energético, os impactos ambientais e o desperdício sejam minimizados ou mesmo zerados (VAZ *et al.*, 2016).

Obviamente, a evolução de tecnologias limpas não tem como interesse a diminuição do desenvolvimento econômico, muito pelo contrário. O intuito é suprir de forma consciente e sustentável a necessidade de serviços, bens e produtos da sociedade atual. Além disso, os modelos de produções que são baseados em tecnologias limpas

têm sempre como intuito a reciclagem total dos resíduos gerados no processo produtivo, assim como o objetivo claro de não gerar emissões e resíduos (MAZON, 1992).

Segundo Toledo (1987), a qualidade final de um produto resulta de um conjunto de características imputadas a ele ao longo de todo o seu ciclo de vida, que é entendido aqui como envolvendo as fases de concepção, projeto, produção, distribuição e consumo.

McCarthy (1976) define que o conceito de ciclo de vida dos produtos é essencialmente importante para o planejamento estratégico porque mostra que diferentes estratégias são necessárias à medida que um produto se desloca ao longo do seu ciclo. Assim, os gestores precisam estar conscientes de que o ciclo de vida de um produto é uma das peças essenciais para o alcance do melhor desenvolvimento e resultado dessa “grande engrenagem”.

A LCA é uma técnica analítica para avaliar impactos ambientais e provê dados que podem ser usados para medir os potenciais impactos ao longo da vida de um produto, a partir da aquisição da matéria-prima, produção, utilização e eliminação (ISO 1997), enquanto a ferramenta LCCA indica os valores monetários de processos e fluxos associados a um produto ou sistema (KEOLEIAN e SPITZLEY, 2006).

A integração das ferramentas LCA-LCCA em uma única metodologia é capaz de avaliar o ciclo de vida do pavimento, levando em consideração o consumo de energia, impactos ambientais, além dos custos, incluindo os encargos incorridos nos materiais utilizados e na produção de combustível (ZHANG *et al.*, 2008).

Assim, a integração entre as duas metodologias permite apoiar uma decisão quanto às alternativas de construção e conservação mais sustentáveis (sob o ponto de vista de durabilidade, economia e meio ambiente), podendo ser usada em diversas obras de pavimentação.

1.1. Objetivo

O objetivo do trabalho é propor a aplicação integrada das ferramentas LCA e LCCA, por meio de dados indicadores de sustentabilidade e viabilidade econômica no âmbito da construção e manutenção de um pavimento, de forma a auxiliar na tomada de decisão quanto à estrutura de pavimento a ser adotada, onde a solução consideraria não somente a questão custo-benefício, mas também aspectos de sustentabilidade. Para tanto, a pesquisa levou em conta três tipos de pavimentos propostos para uma rodovia que se encontra em fase de implantação.

A avaliação leva em consideração a emissão de poluentes desde a produção da matéria-prima para a implantação da rodovia, assim como custos que se têm desde a implantação da rodovia e ao longo de 20 anos de análise: custos de conservação periódica e restauração; e custos impostos aos usuários da rodovia, mediante aos atrasos de viagem em períodos de manutenção; custos adicionais de combustível devido à irregularidade da superfície do pavimento; e custo atribuído ao risco de acidentes em períodos de restauração da rodovia, por causa do tráfego em zonas de trabalho .

Será realizada a integração dos resultados obtidos com o uso da análise multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*) na qual é possível verificar não só a melhor alternativa sob o aspecto de sustentabilidade ambiental, mas também a melhor alternativa visando o melhor custo-benefício do empreendimento, através da criação de uma matriz de prioridades.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O primeiro traz uma Introdução ao tema, abordando de forma sucinta e justificando a importância deste trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o conceito de análises do ciclo de vida e do custo do ciclo de vida. Também são relatados alguns trabalhos já realizados e que discorrem sobre o assunto.

O capítulo três, mostra de forma detalhada os pavimentos que serão analisados, assim como a metodologia de dimensionamento utilizada tanto para a definição da estrutura inicial como para a restauração dos pavimentos ao longo do período de análise. São apresentados também os intervalos para a conservação periódica e restauração de cada pavimento. Apresenta de forma detalhada toda a metodologia empregada para o desenvolvimento da presente pesquisa, primeiramente para a LCA e posteriormente para a LCCA, até a obtenção dos resultados. Após uma apreciação comparativa das duas pesquisas realizadas, os resultados são submetidos a uma avaliação multicritério no qual é usado o método AHP.

As conclusões do trabalho e comentários são apresentadas no capítulo quatro. Esta seção aborda as vantagens e desvantagens da utilização de cada pavimento proposto visando tanto os aspectos ambientais como os aspectos econômicos.

No capítulo cinco são apresentados alguns temas propostos para estudos futuros a fim de dar continuidade a essa pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

LCA e LCCA são duas técnicas de avaliação que estão disponíveis para serem utilizadas pelas agências rodoviárias como ferramentas de tomada de decisão, podendo ser usadas separadamente ou de forma complementar (PELLECUER, 2016).

A LCA envolve a avaliação dos aspectos ambientais de um sistema de produto através de todas as fases do seu ciclo de vida. Às vezes também chamada de "análise do berço ao túmulo", representa uma família de ferramentas e técnicas para ajudar na gestão ambiental e, a mais longo prazo, no desenvolvimento sustentável (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1997).

2.1. Análise de Ciclo de Vida (LCA)

Segundo Zaumanis *et al.* (2011), os primeiros estudos para analisar os aspectos do ciclo de vida de produtos e materiais datam da segunda metade do século XX, sendo focados em questões como a eficiência energética, o consumo de matérias-primas e, até em certo ponto, eliminação de resíduos.

Os precursores do LCA iniciaram o desenvolvimento de seus trabalhos para analisar o ar, terra, água e emissões de resíduos sólidos. Posteriormente, se incluiu energia, utilização de recursos e emissões químicas, com foco em produtos de consumo e embalagens de produtos, em vez de sistemas de infraestruturas complexas (HUNT *et al.*, 1992; GUINÉE, 2012).

Desde 1969, esses estudos focalizavam o consumo de recursos ambientais, (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1997). Enquanto isso, na Europa, uma abordagem semelhante foi sendo desenvolvida e mais tarde ficou conhecida como o "balanço ecológico". Em 1972, no Reino Unido, Ian Boustead² calculou a energia total usada na produção de uma variedade de tipos de recipientes de bebidas, incluindo vidro, plástico, aço e alumínio. Ao longo dos próximos anos, Boustead consolidou sua metodologia para torná-la aplicável a uma variedade de materiais e, em 1979, publicou

² LCA - How it Came About, The Beginning in the UK, Ian Boustead in the International Journal of Life Cycle Assessment, 1972.

o Manual de Análise de Energia Industrial (EUROPEAN ENVIROMENT AGENCY, 1997).

A partir de 1990 houve um notável crescimento das atividades LCA na Europa e nos EUA, o qual é refletido no número de "workshops" e outros "fóruns" que têm sido organizados principalmente pela SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (FERREIRA, 2004).

O ciclo de vida de um produto abrange todas as atividades de produção para a utilização, transporte, uso e descarte de um produto. O ciclo de vida típico consiste de uma série de estágios, da extração à execução das matérias-primas, através da concepção e formulação, transformação, fabricação, embalagem, distribuição, utilização, reutilização, reciclagem e, em última instância, a eliminação de resíduos (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1997).

Trata-se da avaliação do fluxograma da produção de um produto em todas as fases do seu ciclo de vida e representa uma família de ferramentas e técnicas para auxiliar na gestão ambiental em longo prazo no desenvolvimento sustentável. Algumas pessoas acham a LCA útil como conceito de sustentabilidade, outros como um conjunto de ferramentas práticas: ambas as visões estão corretas, dependendo do contexto (KENDALL, 2004).

A LCA é regulamentada pelas normas internacionais ISO 14040 (1997) e ISO 14044 (1997), que no Brasil são chamadas de NBR ISO 14040 (2001) e NBR ISO 14044 (2001), respectivamente. Estas normas dão a seguinte estrutura à LCA:

- Definição de objetivo e escopo;
- Análise de inventário de ciclo de vida;
- Avaliação de impacto de ciclo de vida;
- Interpretação ou análise comparativa.

A estrutura da LCA não é uma estrutura fixa e pode-se seguir adiante ou retornar ao processo conforme Figura 1.

Figura 1 - Fases de uma LCA

Fonte: ISO 14040 (2001)

Segundo a norma ISO 14040:2001, a LCA pode ser definida como “a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto; a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas; a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos”.

A análise de inventário descreve os fluxos de materiais e de energia do sistema, que é dado em etapas, como a extração de matérias-primas, transporte, produção, consumo e descarte de resíduos. (STRIPPLE, 2001).

Já os dados de saída relacionam-se aos produtos, subprodutos e rejeitos, sendo estes últimos subdivididos em emissões atmosféricas, efluentes líquidos, resíduos sólidos e rejeitos energéticos. Assim sendo, pode-se dizer que elaboração do ICV (inventário do ciclo de vida) se incumbe, então, de produzir um conjunto de dados organizados sob a forma de um inventário, capazes de expressar em termos quantitativos os aspectos ambientais associados a um sistema de produto (PENNINGTON *et al.*, 2004).

A LCA fornece uma abordagem abrangente quanto ao impacto ambiental total de um produto específico (como a produção de uma tonelada de agregado, por exemplo) ou sistemas mais complexos de produtos ou processos (tais como transporte desses

produtos), examinando todos os parâmetros de entradas e saídas durante o seu ciclo de vida. Na Figura 2 é apresentado um modelo genérico do ciclo de vida de um produto. Como pode ser observado, o ciclo de vida começa na aquisição de matérias-primas, prossegue através de vários estágios distintos, incluindo o processamento de material, fabricação e uso, terminando no chamado Fim da Vida.

Figura 2 - Ciclo de vida genérica de um sistema de produção LCA

Fonte: Adaptado de Kendall (2012)

Como mostrado na Figura 2, o modelo LCA utiliza materiais e energia como dados de entrada para cada um desses "estágios", enquanto têm-se resíduos e poluição como dados de saída, onde estes últimos podem ser traduzidos em impactos ambientais e sociais. Além disso, verifica-se também que o Fim da Vida pode incluir a reciclagem, fazendo com que o produto retorne ao seu ciclo de vida.

Segundo Walls e Smith (1998), a técnica ou ferramenta LCA pode ser usada para uma variedade de fins, incluindo:

- Identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos e sistemas de produção em vários pontos em seu ciclo de vida;
- Informar e orientar as tomadas de decisão como parte do planejamento estratégico e de definição de prioridades;
- Seleção de procedimentos e processos.

Os principais impactos avaliados na metodologia LCA são poluição do ar e poluição da água, os quais serão descritos a seguir:

Poluição do ar

O impacto do aquecimento global é caracterizado por emissões de GEE (gases de efeito estufa) em toneladas métricas de CO₂ equivalentes. Isto é calculado multiplicando-se a massa emitida de cada GEE pelo seu potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potential*), onde o valor de GWP é de 1 para o CO₂, 23 para o metano (CH₄) e 296 para o óxido nitroso (N₂O) (HOUGHTON, 2001). Ou seja, o impacto do CH₄ sobre a mudança climática, por exemplo, é 23 vezes maior do que o CO₂.

O CO₂ é liberado através da queima dos combustíveis fósseis (gasolina, diesel, querosene, carvão mineral e vegetal). A grande quantidade de dióxido de carbono na atmosfera é prejudicial ao planeta, pois ocasiona o efeito estufa e, por consequência, o aquecimento global.

Já o CH₄ é produzido pela decomposição da matéria orgânica, sendo abundante em aterros sanitários, lixões e reservatórios de hidrelétricas. Também é originado na criação de gado (a pecuária representa 16% das emissões mundiais de GEE), no cultivo de arroz inundado³ e na produção de combustíveis fósseis (gás, petróleo e carvão). Adicionalmente, se comparado ao CO₂, é mais perigoso, pois o metano é mais eficiente na captura de radiação do que o CO₂.

Por outro lado, o N₂O está presente onde há matéria orgânica com alto teor de nitrogênio disponível e excesso de oxigênio. Esse potente gás de efeito estufa é

³ O cultivo de arroz irrigado por inundação representa uma das principais fontes antrópicas globais de metano (CH₄). Estima-se que a taxa de emissão global desse gás nos campos de arroz irrigado varie em 20 a 100 Teragramas (média de 60 Tg) por ano, o que corresponde a 16% do total de emissão de todas as fontes (IPCC, 1995).

produzido a partir do emprego de fertilizantes em atividades agrícolas, especialmente fertilizantes comerciais e orgânicos, fazendo parte do grupo de gases indicados no Protocolo de Quioto⁴. Além disso, também é produzido na queima de biomassa, de combustíveis fósseis e na fabricação de ácido nítrico. Segundo o relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (1996), o CO₂ é responsável por mais de 97% das emissões totais de GEE de fontes móveis. Os especialistas do IPCC julgam que a incerteza dos cálculos para esse gás é da ordem de 5%. Por sua vez, o N₂O e o CH₄ contribuem, aproximadamente até 3% e 1% e as incertezas são de cerca de 50% e 40%.

Portanto, a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) que é inventariada no presente estudo inclui dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄) e ácido nitroso (N₂O).

Poluição da água

Os parâmetros normalmente empregados para medir a componente orgânica dos efluentes são DBO_{5,20}⁵ e DQO⁶. Nas mesmas condições, efluentes com maiores concentrações destes componentes citados resultam em maiores emissões de CH₄ do que os efluentes com menores concentrações.

Se a quantidade de matéria orgânica for baixa, as bactérias decompositoras necessitarão de pequena quantidade de oxigênio para decompô-la, então a DBO será baixa. Neste caso, as moléculas orgânicas de estruturas complexas e altos valores energéticos da matéria orgânica são utilizados pelas bactérias como fonte de alimento e energia. Adicionalmente, para ocorrer o processo de nutrição e, assim, liberação de energia, há necessidade de que os organismos aeróbios respirem. Quando esses microrganismos respiram, roubam certa quantidade de oxigênio, ou seja, provocam uma demanda deste último (SILVA, 1990).

⁴ O Protocolo de Quioto constitui um tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, definindo metas de redução de emissões para os países desenvolvidos ou com a economia em transição para o capitalismo, considerados os responsáveis históricos pela mudança atual do clima (MMA, 2011).

⁵ Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}): é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica biodegradável presente na água, (onde _{5,20} expressa a quantidade em kg/dia).

⁶ Demanda Química de Oxigênio (DQO): é a quantidade de oxigênio dissolvido (OD), consumido em meio ácido, que leva à degradação de matéria orgânica.

2.2. LCA na pavimentação

A partir do ano 2001, começam a surgir trabalhos e pesquisas visando a aplicação da ferramenta LCA para serviços de pavimentação, os quais são definidos de diferentes maneiras, dependendo do escopo, perspectivas e da metodologia empregada.

Dentre as análises publicadas, Zhan e Zhang (2009) promoveram a utilização da abordagem dos meios de impacto, enquanto Ozbay *et al.* (2007a) avaliaram os impactos causados pela poluição atmosférica e sonora. Joumard *et al.* (2011) e Samberg *et al.* (2011) promoveram o uso de análise multicritérios para projetos de estradas e sistemas de transportes em geral, respectivamente. Nathman *et al.* (2009) e Ozbay *et al.* (2007b) consideram o ruído ou a poluição do ar nas avaliações. Huang *et al.* (2009) e Samberg *et al.* (2011) abordam elementos que resultam em uma definição de impactos ambientais. Além disso, mesmo entre os estudos que adotam o mesmo escopo ou estrutura, não há consenso sobre os impactos ambientais que devem ser levados em conta. Por exemplo, Gosse *et al.* (2013) apenas inclui as alterações climáticas, enquanto Zhang *et al.* (2013) inclui efeitos na saúde humana devido à poluição atmosférica e sonora, mas não considera as alterações climáticas (PELLECUER, 2016).

Dentre os principais trabalhos produzidos, e que servem como referência para os demais autores, se destacam Stripple, que em 2001 publicou um relatório onde analisa passo a passo, não somente o teor de energia inerente em materiais da estrutura do pavimento, mas também da iluminação, sinalização e demais elementos que compõe a infraestrutura viária e a influência de diferentes materiais. Em 2004, Kendall publicou uma tese onde apresenta um modelo detalhado desenvolvido para comparar a sustentabilidade de tabuleiros de pontes de concreto, visando o consumo de energia das alternativas propostas. No Canadá, o *Athena Institute* (2006) publicou um relatório que indica o consumo de energia primária (energia contida nos combustíveis crus, além de energia solar, eólica, geotérmica e outras formas de energia que constituem uma entrada ao sistema) e de potencial de aquecimento global (GWP) estimado para a construção e manutenção de pavimento asfáltico (flexível) e pavimento de concreto de cimento Portland (rígido), para vias urbanas e rodovias canadenses. Said *et al.* (2010) publicaram um artigo no qual relatam estudos de investigação LCA para pavimentos, além de estudos de caso, fornecendo

recomendações para futuras pesquisas, visando melhorar a compreensão da sustentabilidade em pavimentos. Em 2012, Butt produziu uma tese na qual apresenta três estudos de caso com a completa aplicação da metodologia LCA, tendo como ênfase o cálculo e alocação de energia utilizada para o ligante e os aditivos. Recentemente, em 2012, a USIRF (*French Road Builders Union*) publicou um artigo que demonstra o uso do *software* SEVE, que compara o impacto de alternativas de pavimentos optando por técnicas ambientalmente amigáveis.

No Brasil, Bandeira e Floriano (2004), através da Associação de Pesquisa, Educação e Proteção Ambiental do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (ANORGS), apresentaram um relatório onde abordam o levantamento do passivo e ativo ambientais, contemplando os impactos sobre os meios físico, biótico e antrópico, nas áreas de influência da rodovia, ocorridos em função de obras já existentes ou executadas anteriormente. Por outro lado, Silva *et al.* (2014) publicaram um artigo onde mostram a avaliação ambiental de processos com pavimentos rígido e flexível com análise do ciclo de vida.

De acordo com Santero e Horvath (2009), o impacto ambiental pela implantação e manutenção de um pavimento foi expandido, devido à fabricação dos materiais de pavimentação. Alguns dados como tempo de atraso de viagem, interação entre a superfície do pneu e pavimento, refletância da superfície do pavimento, incorporados ao LCA fornecem informações valiosas para melhores práticas de preservação do meio ambiente. Dentro deste contexto, através da construção de um modelo de LCA para aplicações em infraestrutura rodoviária, pode-se visualizar a melhor opção no que se refere à seleção dos tipos de estrutura de pavimentos a serem adotados na implantação de uma rodovia, visando o aspecto ambiental.

Geralmente, a quantidade de emissões de CO₂ é proporcional ao consumo de energia. No caso da indústria do cimento, por exemplo, como a sua produção libera CO₂ durante a calcinação do calcário, esta é responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO₂ (CSI, 2002). De maneira geral, suas emissões específicas correspondem a aproximadamente 50% ocorridas no processo produtivo, cerca de 5% no transporte, 5% com o uso de eletricidade e os outros 40% no processo de clínquerização (WBCSD, 2002).

Para uma análise LCA na pavimentação é necessário obedecer a um processo onde, primeiramente, deve-se realizar o cálculo e a avaliação das quantidades de energia consumidas, bem como as emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a produção, transporte, implantação, manutenção e reabilitação da rodovia durante o período de vida útil. Por fim, é preciso analisar a viabilidade da solução adotada frente a estratégias políticas ou econômicas (contexto da LCCA) (ZHANG *et al.*, 2007).

A partir dos dados de energia primária atribuídos a cada insumo ou etapa do processo de produção ou extração da matéria-prima é possível obter a energia total consumida para execução do serviço ou atividade.

A fase de construção do pavimento engloba todos os custos e impactos referentes aos materiais que serão empregados para a implantação da rodovia. A seleção e utilização dos equipamentos também são de grande importância tanto em função do custo como na eficiência para a execução das tarefas. A distância média de transporte (DMT) está intimamente ligada à construção, manutenção e fim da vida do pavimento. Todos os materiais, equipamentos e resíduos são transportados por uma combinação que pode ser de rodovias, estrada de ferro, ou por vias navegáveis. Os impactos ambientais para distribuição incluem tanto a produção de combustível dos veículos de transporte como também as suas emissões (ZHANG *et al.*, 2007).

Segundo estudo de 1997 realizado pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) e ANTP (Associação Nacional dos Transportes Públicos), o consumo de combustível, assim como a emissão de poluentes estão relacionados à variação da velocidade.

Segundo Vasconcellos (2006), o consumo de combustíveis tem relação potencial e inversa com a velocidade de circulação do veículo, ou seja, ele aumenta muito quando a velocidade se reduz. Neste sentido, o IPEA, em conjunto com a ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos), entre 1997 e 1998, desenvolveram um estudo que demonstrava o aumento do consumo de combustível conforme se reduz a velocidade dos veículos, na Figura 3, é possível verificar o consumo em função da velocidade.

Figura 3 - Consumo de combustível x Velocidade

Fonte: Vasconcellos, 2006

Na Figura 3 observa-se que o consumo é reduzido de forma exponencial em função do aumento da velocidade, até estabilizar-se em torno de 10 L/km (VASCONCELLOS, 2006).

Porém, levando-se em conta que os trabalhos de restauração e conservação muitas vezes são realizados em períodos noturnos, há redução de diversos prejuízos aos usuários, devido à não interrupção ou diminuição do fluxo do tráfego durante os serviços de conservação e restauração.

Os prejuízos ou danos aos usuários nesse caso é composto por uma agregação dos atrasos no tempo de viagens, custos de manutenção do veículo, aumento do uso do combustível e risco de acidentes (WILDE *et al.*, 2001).

Para auxílio à elaboração de uma LCA existem no mercado diversos tipos de *softwares* específicos, sendo que, em linhas gerais, os *softwares* contêm bancos de dados com informações referentes a diversos processos produtivos (matérias-primas, energia, transporte, resíduos, entre outros) que podem ser escolhidos pelo usuário para a elaboração de um sistema de produto, e que relacionam esses processos às respectivas categorias de impacto ambiental. Após elaborados os cálculos, através de modelos de caracterização, os *softwares* apresentam os resultados que são valores

relacionados à quantidade de GEE ou poluição gerados pelo produto em cada uma das categorias analisadas. Alguns dos programas mais utilizados atualmente são: OpenLCA.4, SimaPro 8.0, GaBi 6, UmbertoXT, QuantisSuite 2.0, sendo o SimaPro bastante difundido no mundo. Os dados de entrada para a criação do inventário podem ser obtidos através de informações dos fabricantes ou com o uso de bibliografias e bancos de dados confiáveis. Um banco de dados muito conhecido e que mantém parceria com a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) é o Ecoinvent[®], que é constituído de uma ampla biblioteca de inventários com valores de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia), associadas ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos, sistemas de energia, transporte, disposição de resíduos, dentre outros. A primeira versão foi desenvolvida em 2003 pelo Instituto Federal Suíço para Pesquisa e Testes de Materiais – EMPA, em parceria com diversos institutos governamentais suíços. A segunda versão foi lançada no ano de 2007, já pela Ecoinvent[®] Centre, estabelecendo-se como a maior biblioteca de inventários do ciclo de vida do mundo com mais de 2.700 inventários (ECOINVENT, 2010). Em 2013 foi lançado o Ecoinvent[®] 3, contendo quase 10 mil inventários entre abordagens dos seus atributos e consequências.

Esta base originou de uma base de dados nacional Suíça, e agora é uma base de dados global. Embora na versão 3 existam processos globais para todas as atividades, e tenha havido um esforço de coletar dados novos, em muitos casos os conjuntos de dados globais são apenas uma extrapolação de um dos conjuntos de dados regionais (WEIDEMA et al., 2013).

Para a presente pesquisa foi utilizado, dentro do banco de dados da Ecoinvent[®], os dados de consumo de energia e emissões da construção de uma rodovia australiana, uma vez que se trata de local com características climáticas semelhantes às brasileiras.

2.3. Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA)

De acordo com a FHWA (2002), a análise de custo do ciclo de vida (LCCA) é uma técnica de avaliação aplicável para a consideração de certas decisões de

investimento, uma vez que a LCCA ajuda a determinar o melhor custo-benefício para a realização de um projeto.

Segundo Berliner (1992), “o custo do ciclo de vida é necessário para: definir um quadro mais claro da rentabilidade do produto a longo prazo; mostrar a eficiência do planejamento de ciclo de vida; quantificar o impacto de custos da alternativa escolhida durante a fase de engenharia e projeto; e atribuir os custos de tecnologia para os produtos que a utilizam.

Desse modo, os custos dos produtos que incorrem durante o seu ciclo de vida devem ser acumulados para propiciar um quadro de rentabilidade em longo prazo, e suportar decisões-chave a respeito da linha do produto, da participação no mercado e da política de preços (BEUREN e SCHAEFFER, 1997).

2.4. LCCA na pavimentação

Segundo Walls e Smith (1998), para o desenvolvimento da metodologia LCCA é necessário definir todos os passos processuais envolvidos na realização de uma análise de custo do ciclo de vida. Os custos de ciclo de vida referem-se a todos os custos (incluindo os benefícios), envolvidos na construção, manutenção e reabilitação de um pavimento durante seu ciclo de vida completo (COSTA, 2008).

Segundo Adler (1978), a importância de se desenvolver estudos econômicos em um empreendimento antes de este se materializar está na possibilidade de se avaliar os custos e os benefícios econômicos, proporcionando uma forma de identificar se os benefícios líquidos propostos serão, pelo menos, iguais àqueles que poderiam ser obtidos em outras oportunidades de investimento, esgotando-se todas as alternativas e cenários possíveis.

A maior parte dos estudos de LCCA em pavimentos concentra-se em estudos norte-americanos e europeus. Os conceitos LCCA em rodovias foram introduzidos nos Estados Unidos a partir de 1853, com a publicação do “*A Manual of the principles and practice of road-making: Comprising the location, construction and improvement of roads*” pelo professor William Mitchell Gislerpie. Neste trabalho se associou ao custo do projeto não só a construção, mas também a manutenção da rodovia. Buscando

uma melhor forma de analisar o custo do ciclo de vida do pavimento, em 1998, Walls e Smith publicaram (através da FHWA) um documento onde recomendam e discorrem sobre como se deve conduzir uma análise do tipo LCCA. Em 2006, o Departamento de Transporte do Colorado (CDOT) publicou um trabalho com o intuito de descrever a metodologia CDOT para selecionar as taxas de desconto a serem utilizados em cálculos de LCCA. Na Europa, no ano de 2007, a EAPA publicou um manual com o principal objetivo de desenvolver um padrão para produção de pavimentos economicamente viáveis, considerando a questão do ciclo de vida. Em 2010, o Departamento de Transporte da Califórnia (CALTRANS) desenvolveu um trabalho com o objetivo de estudar a melhor alternativa para investimento em pavimento rodoviário no estado da Califórnia.

No Brasil pode-se citar alguns pesquisadores que desenvolveram trabalhos relacionados à metodologia LCCA. Mesquita (2001) fez uma avaliação econômica comparativa de custos entre a alternativa de pavimento rígido e flexível, levando em conta a questão da preservação das condições da superfície de rolamento por um período de 20 anos, enfocando o conceito de análise do ciclo de vida útil destes pavimentos. Biroli (2003) elaborou um estudo de todas as parcelas de custos que envolvem os pavimentos flexíveis e rígidos durante sua vida em serviço, abordando os custos de construção, manutenção e reabilitação e os custos de operação dos veículos. Rodrigues Filho (2006) elaborou uma avaliação econômica utilizando-se do conceito de LCCA, onde identifica o ponto de equilíbrio econômico entre o uso de um pavimento flexível ou rígido em função do nível de tráfego e capacidade de suporte de subleito relacionado a custo/m² e taxa de amortização. Tem-se ainda, como outras publicações sobre a metodologia LCCA no Brasil, o DNIT (2006b), com a descrição passo a passo desta, além do trabalho de Santos (2011), que foca em uma abordagem probabilística no dimensionamento de pavimentos rodoviários tanto asfálticos quanto rígidos, além de uma análise econômica destes.

O uso da metodologia LCCA em pavimentação inicia-se com o desenvolvimento de alternativas de estruturas de pavimento e análise do seu desempenho. Dentro deste contexto, são definidos os cronogramas de atividades iniciais e futuras envolvidas na implementação de cada uma das alternativas de concepção do projeto, bem como são estimados os custos dessas atividades, além dos custos gerados aos usuários.

Assim, os calendários das atividades previstas formam o ciclo de vida para cada alternativa adotada (CALTRANS, 2013).

A finalidade principal de um LCCA é a de quantificar o comportamento de um pavimento ao longo da sua vida de serviço. A decisão estratégica sobre a solução a ser adotada leva em consideração a necessidade de manutenção e reabilitação desse pavimento, sendo necessário manter algum nível mínimo aceitável preestabelecido de serviço por um tempo especificado. Um dos níveis que indicam o gatilho para a restauração de um pavimento é a irregularidade da superfície de rolamento (IRI - *International Roughness Index*), que aumenta de forma contínua ao longo do tempo e, geralmente, é definido em função da irregularidade da superfície da via que afeta o funcionamento de um veículo, incluindo a velocidade de viagem, economia de combustível, emissões e segurança (ZHANG *et al.*, 2007). Por isso, a irregularidade também impacta na operação do veículo e nos custos de manutenção (SAYERS *et al.*, 1986).

A irregularidade da superfície de rolamento pode ser avaliada frequentemente através do Índice de Irregularidade Internacional (IRI), que foi concebido na década de 80 pelo Banco Mundial com a finalidade de determinar e aferir a qualidade (níveis de conforto e de segurança) dos pavimentos por ele financiados.

Em Zhang *et al.* (2007) descreve-se um projeto em que se testou o impacto da irregularidade da pista sobre o consumo de combustível de caminhões pesados (EPPS *et al.*, 1999), cujo resultado mostrou que a economia de combustível diminuiu de 1,87 km/l para 1,79 km/l, enquanto que o IRI aumentou de 1,2 para 2,4 m/km.

O avanço do valor do IRI pode aumentar o consumo de combustível, como apresentado pelo Departamento de Transporte do Missouri (Amos, 2006). Neste trabalho a economia de combustível aumentou ligeiramente de 9,06 km/l a 9,13 km/l para motores a gasolina e veículos leves, e de 2,51 km/l para 2,6 km/l para caminhões movidos a diesel, conforme o IRI foi melhorado de 2,03 m/km para 0,95 m/km. Com base nos dados, foi desenvolvido um fator de consumo de combustível (FCF) para descrever o aumento no consumo de combustível de veículos que circulam nos pavimentos deteriorados (Yu *et al.*, 2013). Cabe mencionar que o IRI descreve uma escala linear de irregularidade, começando com 0 m/km para uma superfície

perfeitamente plana e nenhum limite superior teórico, embora os valores IRI acima de 8 m/km provocam uma condução desconfortável, causando a redução da velocidade (ARCHONDO-CALLAO, 1999).

2.5. A integração LCA-LCCA

Zhang *et al.* (2008) apresentaram um modelo interligado de avaliação do ciclo de vida e análise do custo do ciclo de vida para sistemas de restauração de pavimentos. Embora a pesquisa seja a integração dos métodos, os autores mostram os resultados, porém, não fazem uma comparação entre os resultados obtidos.

Já no Brasil, não se tem conhecimento de estudos que utilizem as ferramentas LCA e LCCA de forma integrada.

De modo geral, os métodos de análise LCA e LCCA variam em alcance e profundidade, pois quantificam diferentes tipos de custos. Por exemplo, o modelo LCCA pode ser responsável apenas por custos financeiros (custos às agências de administração rodoviária), tais como custos de construção e os custos de manutenção. Também pode ser responsável por custos sociais, tais como custos que são incorridos pelos motoristas que estão atrasados ou frustrados pelo tráfego decorrente da manutenção ou construção da via, enquanto que a ferramenta LCA analisa os custos dos danos ambientais associados a eventos da construção.

O objetivo da integração LCA-LCCA é conectar os resultados, para mostrar de forma analítica os indicadores de sustentabilidade e viabilidade de investimento para diferentes alternativas de solução de pavimentos. Esta integração permite observar o ciclo de vida do pavimento, levando em consideração consumo de energia, impactos ambientais e custo-benefício para cada solução proposta, incluindo os encargos incorridos nos materiais utilizados e na produção de combustível (ZHANG *et al.*, 2007).

Com a definição de uma conexão entre LCA e LCCA e a aplicação de uma avaliação comparativa é possível verificar o impacto ambiental e o custo entre diferentes estruturas de pavimento. Dentro deste contexto, a Figura 4 mostra um modelo com a integração das duas ferramentas LCA-LCCA.

Figura 4 - Modelo LCA-LCCA integrado

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2007)

O modelo LCCA incorpora resultados de avaliação do ciclo de vida do pavimento, como custos de construção e conservação ou restauração, aluguel de equipamentos e aspectos operacionais, além de custos sociais já que as atividades de construção e manutenção afetam diretamente o fluxo de tráfego e esses impactos, por sua vez, resultam em custos para os usuários da rodovia.

Vale ressaltar que os resultados da análise integrada dependem principalmente da precisão dos parâmetros de entrada: quanto maior o número de parâmetros informados, qualidade dos dados e estimativas utilizadas, mais precisos serão os resultados finais.

3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Neste trabalho as ferramentas LCA e LCCA foram integradas e aplicadas em um estudo de caso de três estruturas de pavimento propostas para uma rodovia que está em fase de implantação no Estado de São Paulo, sendo uma do tipo flexível com capa de rolamento em mistura asfáltica, outra do tipo semirrígido invertido com capa de rolamento em mistura asfáltica e sub-base constituída por camada com adição de cimento, e a terceira do tipo rígido com camada de rolamento em concreto de cimento Portland.

3.1. Descrição dos pavimentos propostos

Para o estudo em questão são propostas três estruturas de pavimento distintas (tipo flexível, semirrígido e de concreto), cuja aplicação estaria voltada para uma rodovia estadual, pista dupla com 2 faixas por sentido (cada uma com largura de 3,6 m), acostamentos nos dois sentidos (cada um com largura de 3 m) e faixa de segurança também nos dois sentidos (cada um com largura de 1 m junto à barreira rígida dupla no centro). A obra terá 10 km de extensão.

Foram realizadas investigações no subleito para determinação do CBR (*California Bearing Ratio*) de projeto. Portanto, para todas as estruturas propostas será considerado que serão apoiadas sobre subleito compactado com energia 100% do Proctor normal, atingindo um valor de CBR mínimo de 8%.

Para o cálculo do volume de tráfego foram utilizadas as metodologias USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), sendo que para os pavimentos asfálticos, o tráfego considerado para um período de projeto de 10 anos resultou em $N_{USACE\ 10anos}=3,11 \times 10^7$ e $N_{AASHTO\ 10anos}=1,07 \times 10^7$, e para o pavimento de concreto o tráfego para um período de projeto de 20 anos é o $N_{AASHTO\ 20anos}=4,14 \times 10^7$. Os valores de número N usados são resultantes de estudos de tráfego baseados no volume diário médio (VDM total de 6.506, com 1.851 veículos pesados), obtido através de contagem de tráfego caracterizada, tendo sido realizados especificamente para o desenvolvimento do projeto da rodovia em questão.

Para o dimensionamento das estruturas flexível e semirrígida utilizadas no presente estudo foi empregado o método empírico no qual a espessura do pavimento se relaciona com o valor de CBR. Apesar de ser uma rodovia estadual para o dimensionamento das estruturas analisadas foi utilizado o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) que apresenta os procedimentos, critérios e padrões a serem adotados, como os valores mínimos recomendáveis para a elaboração do projeto de pavimentação. Em seguida, foi realizada uma análise mecanística fundamentada no cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos da estrutura do pavimento, tendo sido empregado o programa de camadas elásticas ELSYM-5 (*Elastic Layered System*).

Sabe-se que no Brasil a variedade de tipos de materiais adequados para a utilização em pavimentação, porém, os materiais utilizados em cada estrutura proposta foram criteriosamente solicitados pelo cliente que de antemão já tinha como pressuposto utilizar os materiais avaliados.

Apesar da utilização do método do CBR para o dimensionamento das estruturas asfálticas, adotou-se também a verificação mecanicista das estruturas propostas. Para o pavimento tipo A, levou-se em consideração não somente o dimensionamento inicial para a implantação do pavimento, mas também foi analisado o período de intervenções futuro, no qual ponderando-se a análise de tensões e deformações equivalentes para os pavimentos Tipo A e B para o presente estudo, tem-se camadas mais esbeltas para o pavimento Tipo A. Porém, após o 15º ano de utilização da rodovia, o seu uso seria inviabilizado, devido à frequência de intervenções que este exigiria. Portanto, para o dimensionamento das estruturas de pavimento, buscou-se não somente atender a viabilidade de implantação inicial do pavimento, mas também de utilização da via, devido aos intervalos de restauração.

Pavimento flexível – Tipo A

O primeiro pavimento apresentado na Figura 5 (Tipo A) visa uma estrutura de pavimento flexível com revestimento asfáltico. A estrutura proposta é composta por camada de revestimento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) com espessura de 5 cm, sobre camada de ligação (*binder*) subdividida em duas camadas de 5 cm cada. Estas ficam assentes sobre uma camada de base em brita graduada simples (BGS) com espessura de 20 cm, sobre reforço do subleito em solo brita (SB)

50/50 (composição metade solo e metade brita) com espessura de 30 cm, sendo que o solo utilizado possui comportamento laterítico arenoso (LG').

Figura 5 – Pavimento Tipo A – Estrutura flexível com revestimento asfáltico

Revestimento	CBUQ - 5 cm
	<i>Binder</i> - 5 cm
	<i>Binder</i> - 5 cm
Base	BGS - 20 cm
Reforço	Solo brita - 30 cm
Subleito	CBR $\geq$ 8%

Os parâmetros utilizados quanto às características dos materiais empregados nas camadas do pavimento Tipo A estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de dimensionamento – Pavimento Tipo A

Camada	Material	K	CBR (%)	μ	E (MPa)
Revestimento	Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	2,00	-	0,30	3.500
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	1,00	≥ 80	0,35	350
Reforço do Subleito	Solo brita 50/50 com CBR $\geq 30\%$ GC 100% PI	0,85	≥ 30	0,40	300
Subleito	Solo com CBR $\geq 8\%$ GC 100% PN	-	≥ 8	0,40	80

Onde: K = Coeficiente estrutural, μ = Coeficiente de Poisson, GC = grau de compactação, PI = Proctor intermediária, PN = Proctor normal e E = Módulo de elasticidade.

Conforme mencionado anteriormente, para a verificação mecanicista das estruturas de pavimento asfáltico propostas utilizou-se o programa ELSYM-5, onde admitiu-se carregamento de eixo-padrão de 80 kN (considerou-se eixo simples com rodas duplas solicitando o pavimento com cargas de 2.050 kgf por roda, espaçadas por 28,8 cm, além de pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm².

Deve-se levar em conta que se limitam as tensões e deformações em pontos específicos, particularmente na face inferior do revestimento, onde ocorrem tensões e deformações de tração que provocam trincas por fadiga, e no topo do subleito, onde as tensões e deformações verticais de compressão são associadas ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda. Com isto, os resultados obtidos com o ELSYM-5 são, então, comparados aos valores de tensões, deformações e deslocamentos admissíveis obtidos através de modelos de fadiga. Assim, para estimar a vida de fadiga do revestimento asfáltico, a partir da deflexão no topo da camada de revestimento, foi adotado o modelo preconizado no DNER (1979). Para estimar a vida de fadiga do revestimento asfáltico, a partir da deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica, utilizou-se o modelo proposto por FHWA (1976) e para a verificação do número admissível de repetições do eixo padrão em função da deformação específica vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_v) foi adotado o modelo preconizado por Dormon e Metcalf (1965). Os esforços solicitantes obtidos para a estrutura do pavimento Tipo A são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos esforços solicitantes – Pavimento Tipo A

Parâmetro	Unidade	Admissível	Atuante
D_0	0,01 mm	51	32
ϵ_t	mm/mm	2,0E-04	1,44E-04
ϵ_v	mm/mm	-3,1E-04	-2,08E-04

Pavimento semirrígido – Tipo B

A segunda estrutura a ser analisada (Tipo B) trata-se de um pavimento semirrígido invertido (Figura 6), sendo composta por camada de revestimento em CBUQ, com espessura de 5 cm sobre camada de ligação (*binder*) de 6 cm. Estas, por sua vez, estão assentadas sobre base de brita graduada simples (BGS), com espessura de 12 cm e sub-base em brita graduada tratada com cimento (BGTC) com adição de 4% de cimento em peso, com resistência a compressão simples superior a 4,5 MPa aos 7 dias, e espessura de 17 cm. Subjacente a estas camadas tem-se o reforço do subleito em solo de comportamento laterítico (LG'), com espessura de 20 cm, sobre o subleito indicado no item 3.1, cujo CBR mínimo é de 8%.

Figura 6 – Pavimento Tipo B – Estrutura semirrígida invertida com revestimento asfáltico

Revestimento	CBUQ - 5 cm
	<i>Binder</i> – 6 cm
Base	BGS - 12 cm
Sub-base	BGTC - 17 cm
Reforço	Solo LG' - 20 cm
Subleito	CBR $\geq$ 8%

Os parâmetros utilizados quanto às características dos materiais empregados nas camadas do pavimento Tipo B estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de dimensionamento – Pavimento Tipo B

Camada	Material	K	CBR (%)	μ	E (MPa)
Revestimento	Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)	2,00	-	0,30	3.500
Base	Brita graduada simples (BGS)	1,00	≥ 80	0,35	350
Sub-base	Brita graduada tratada com 4% de cimento (BGTC)	1,70	-	0,20	7.500
Reforço do Subleito	Solo LG' com CBR $\geq 15\%$ GC 100% PI	0,85	≥ 15	0,35	150
Subleito	Solo com CBR $\geq 8\%$ GC 100% PN	-	≥ 8	0,40	80

Para a verificação mecanicista da estrutura proposta, além dos modelos de fadiga já utilizados na alternativa anterior, devido ao uso de camada de BGTC na sub-base faz-se necessária a análise das tensões horizontais de tração (σ_t) que ocorrerão na fibra inferior da camada cimentada, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, que podem levar à sua ruptura por fadiga, se forem excessivas. Dentro deste contexto, para a análise mecanicista empregou-se o modelo proposto por Balbo (2007) para flexão de misturas do tipo BGTC. Os esforços solicitantes obtidos para a estrutura do pavimento Tipo B são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados esforços solicitantes – Pavimento Tipo B

Parâmetro	Unidade	Admissível	Atuante
D_0	0,01 mm	51	28
ε_t	mm/mm	2,0E-04	1,38E-04
σ_t	MPa	0,492	0,490
ε_v	mm/mm	-3,1E-04	-1,53E-04

Pavimento de concreto – Tipo C

A terceira estrutura, ilustrada na Figura 7 (Tipo C), se trata de um pavimento de concreto composto por revestimento em concreto de cimento Portland, sub-base em concreto compactado com rolo e sub-base em brita graduada simples.

Figura 7 - Pavimento Tipo C – Estrutura rígida revestimento em concreto de cimento Portland

Revestimento	CCP - 25 cm
Base	CCR - 12 cm
Sub-base	BGS - 15 cm
Subleito	CBR $\geq$ 8% $k = 146$ MPa/m

Onde: k = Módulo de reação⁷

A estrutura é composta por camada de revestimento em concreto de cimento Portland (CCP) com espessura de 25 cm, base em concreto compactado com rolo (CCR) com espessura de 12 cm e camada de sub-base em brita graduada simples (BGS) com espessura de 15 cm. Igualmente aos tipos apresentados anteriormente, a estrutura está assentada sobre o subleito indicado no item 3.1, cujo CBR mínimo é de 8%,

⁷ Para valor de suporte do subleito igual à 8%, o valor de k correspondente é de 44 MPa/m (conforme Pitta, 1998b), porém devido à utilização de base em concreto compactado com rolo com espessura de 12 cm, o valor de k indicado é de 146 MPa/m.

sendo que neste caso ainda se tem o requisito adicional deste possuir módulo de reação de 146 MPa/m.

Foi empregado o método da AASHTO para o dimensionamento do pavimento rígido, versão 1993, para um período de projeto de 20 anos. Neste, o parâmetro W_{18} refere-se ao número previsto de repetições de carga por eixo simples de 18.000 lb, 8,2 tf ou 80kN ($4,14 \times 10^7$). A confiabilidade (R) depende da classe funcional do sistema viário em questão (pavimentos de difícil manutenção), portanto, foi adotado nível de confiabilidade igual a 85%. O desvio padrão (S_o) foi admitido igual a 0,30, devido às condições locais. Já a perda de serventia de projeto (ΔPSI) é função da serventia inicial ($P_i = 4,50$) e final ($P_f = 2,50$). Para o coeficiente de transferência de carga (J) foram considerados os seguintes parâmetros: com acostamento, condição climática rigorosa com períodos de sol intenso, chuvas e frio, sujeitando o pavimento a variação de temperatura e umidade, o valor tido foi 2,85. Por fim, levando-se em conta que o local terá uma boa qualidade de drenagem, em virtude da adoção de dispositivos de drenagem superficial, e que a porcentagem relativa ao tempo em que a estrutura de pavimentação estará exposta a níveis de umidade próximos à saturação é muito baixa, adotou-se coeficiente de drenagem (C_d) igual a 1,15.

Admite-se que cada estrutura de pavimento é construída por um sistema de drenagem superficial e profunda adequado, que garanta um comportamento mecânico normal para as camadas de fundação e também da estrutura do pavimento.

O concreto possui módulo de ruptura à tração na flexão de 4,5 MPa, referente à idade de 28 dias, além de módulo de elasticidade igual ou superior a 30.000 MPa.

Para a camada de base de concreto compactado com rolo, considerou-se consumo de 120 kg de cimento por m^3 de concreto, além de resistência característica à compressão (f_{ck}) maior ou igual a 5,0 MPa aos 7 dias de idade.

Com os valores dos parâmetros adotados anteriormente, calculou-se a espessura necessária de pavimento rígido (D, em polegadas) que atende ao tráfego solicitante, conforme AASHTO (1993).

Obtém-se, portanto, uma espessura de placa de $D = 9,48$ polegadas, resultado em uma espessura final recomendada de 24,10 cm, arredondando-se esse valor para

cima temos uma espessura de 25 cm. Na Tabela 5 subsequente é apresentada a estrutura Tipo C proposta.

Tabela 5 - Estrutura proposta – Pavimento Tipo C

Camada	Espessura (cm)
Revestimento (CCP)	25
Base (CCR)	12
Sub-base (BGS)	15

Por se tratar de uma estrutura constituída por placas de concreto assentadas sobre uma sub-base de concreto rolado (CCR), optou-se por um valor para o espaçamento das juntas das placas de concreto de geometria regular entre 4 e 6 vezes o raio do módulo de rigidez relativo (*stiffness*) conforme proposto por Westergard isso resulta em uma largura de 362 cm para as placas de concreto.

De acordo com a experiência brasileira, a distância máxima de 6,0 m entre juntas transversais é perfeitamente adequada às condições do país enquanto que para juntas longitudinais o espaçamento adequado é de 3,5 m a 3,6 m (DNIT, 2005b). Deste modo, foi então adotada a largura de 3,6 m para as placas de concreto (largura de cada faixa de rolamento). Além disso, de modo a manter placas com formato retangular adotou-se para o comprimento das placas 5,0 m. Portanto, neste projeto as dimensões das placas de concreto de geometria regular são 5,0 m de comprimento por 3,6 m de largura e 0,25 m de espessura para o nível de solicitações e período de projeto determinados.

Para as juntas transversais de retração são previstas barras de transferência, cujo dimensionamento obedece ao mesmo tempo a estudos teóricos e a experiências específicas sobre seu comportamento sob a ação de cargas repetidas, sendo função da espessura da placa de concreto. Assim, as bitolas, comprimentos e espaçamentos dessas barras podem ser obtidos no Estudo Técnico nº13 - "Projeto de Juntas em Pavimentos Rodoviários de Concreto" da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (PITTA, 1998a).

Para placas com espessura de 25 cm de espessura recomenda-se a utilização de barras de transferência com as seguintes características: aço CA-25; comprimento: 46 cm; diâmetro: $\varnothing$ 32 mm; e espaçamento entre barras: 30 cm.

As barras de ligação servem para manter fortemente unidas as faces longitudinais de duas placas separadas por uma junta longitudinal. Tendo-se que a área da seção de aço necessária para cada barra de ligação é 0,93 cm²/m, foi adotada a bitola $\varnothing$ de 12,5 mm, com área de 1,23 cm²/m. Assim, obedecendo o cálculo do comprimento da barra de ligação conforme Pitta (1998b), para assegurar a necessária aderência ao concreto e levando-se em conta uma tensão máxima de aderência aço-concreto de 2,45 MPa, obtém-se o comprimento da barra de ligação de 92,53 cm, adotou-se o comprimento de 100 cm (comprimento comercial) para as barras de ligação. Desta maneira, obteve-se o comprimento e espaçamento para as barras de ligação respectivamente iguais a 100,0 cm e 50 cm.

Resumo - Pavimentos propostos

Resumidamente, na Tabela 6 a seguir são apresentados os pavimentos que são o objeto de estudo dessa pesquisa. Cabe mencionar que, de acordo com as técnicas de dimensionamento de pavimento comumente utilizadas no Brasil, o dimensionamento dos pavimentos asfálticos foi calculado para um período de projeto mínimo de 10 anos, enquanto que a estrutura do pavimento de concreto foi dimensionada para um período de projeto mínimo de 20 anos.

Tabela 6 - Estruturas de pavimentos propostas

	Tipo A Flexível	Tipo B Semirrígido	Tipo C Rígido
N _{USACE 10 anos}	3,11 x 10 ⁷	3,11 x 10 ⁷	-
N _{AASHTO 10 anos}	1,07 x 10 ⁷	1,07 x 10 ⁷	-
N _{AASHTO 20 anos}	-	-	4,14 x 10 ⁷
Revestimento	CBUQ - 5 cm	CBUQ - 5 cm	CCP - 25 cm
	<i>Binder</i> - 5 cm	<i>Binder</i> - 6 cm	
	<i>Binder</i> - 5 cm		
Base	BGS - 20 cm	BGS - 12 cm	CCR - 12 cm
Sub-Base	-	BGTC - 17 cm	BGS - 15 cm
Reforço	SB - 30 cm	Solo LG´ - 20 cm	-
Subleito	CBR ≥ 8%	CBR ≥ 8%	CBR ≥ 8%
			k = 44 MPa/m

3.2. Estratégias de restauração e conservação periódica dos pavimentos

Conceitualmente, a conservação rodoviária compreende o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência realizadas com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário e das instalações fixas, dentro de padrões de serviço estabelecidos (DNIT, 2005a).

Os tipos mais importantes de defeitos que são levados em consideração visando à deflagração de intervenções de restauração são trincamento (principalmente por fadiga); desgaste; panela; afundamento nas trilhas de roda; irregularidade longitudinal; e resistência à derrapagem (DNIT, 2006b).

Uma vez iniciado o processo de trincamento, esse progride até a desintegração das bordas das trincas e, posteriormente, provoca o arrancamento do revestimento e formação de painéis. As trincas abertas na superfície permitem a entrada de água no interior do pavimento e, desta forma, aceleram o processo de deterioração, reduzem a resistência ao cisalhamento dos materiais não tratados e aumentam a velocidade da deformação gerada pelas tensões provenientes dos carregamentos induzidos pelo tráfego. O somatório das deformações ocorrentes em toda a estrutura do pavimento manifesta-se pelos afundamentos nas trilhas de roda e pelas distorções do perfil longitudinal do pavimento. Estes defeitos no pavimento promovem a irregularidade longitudinal, portanto, o aumento desta é o resultado de uma cadeia de mecanismos

de restauração, combinando os efeitos de vários tipos de defeitos e, como tal, não pode ser considerada como um efeito isolado (DNIT, 2006b).

Para a definição dos períodos de restauração dos pavimentos asfálticos foram utilizados os modelos de previsão de desempenho desenvolvidos por Queiroz (1981), a partir da base de dados levantada para a PICR (Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários), iniciada em 1975 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 1982).

Como se trata de uma rodovia estadual que futuramente será concedida, foi adotada a recomendação da ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo), no qual o intervalo mínimo entre intervenções de restauração é de 5 anos, além de: porcentagem de área com trinca classe 3 - FC3 $\leq 2\%$; porcentagem de área com trinca classe 2 - FC2 $\leq 15\%$; e Quociente de Irregularidade (QI) ≤ 35 contagens/km ou IRI $\leq 2,69$ m/km. Adicionalmente, tem-se a exigência de Vida Remanescente ao final do período de análise dos pavimentos será VR > 6 anos e VR - DP > 3 anos (ARTESP, 2014).

Onde:

- VR = Vida Remanescente média global do pavimento ponderada pelas extensões dos subtrechos homogêneos;
- DP = desvio Padrão.

Entende-se por VR de um pavimento, o período mínimo de tempo que a intervenção executada proporcione parâmetros estruturais e funcionais acima dos valores máximos anteriormente estabelecidos.

Para garantir a vida remanescente global para os três pavimentos analisados nesta pesquisa foi considerado 1 ciclo de restauração no último ano de análise (20º ano).

As soluções de restauração adotadas nesta pesquisa, têm, como base a matriz de soluções apresentada na instrução complementar do DER-SP - IC-RP-000/002 (2003), com adaptações para a rodovia em análise.

Os modelos de desempenho utilizados têm como gatilho para a restauração a irregularidade longitudinal (IRI ou QI) do pavimento e também a porcentagem de

trincamento (CR) da área do pavimento. É importante ressaltar que os modelos de desempenho empregados fazem parte do procedimento de projeto DNER-PRO 159/85, conforme DNER (1985).

Cabe mencionar que de acordo com as recomendações da ARTESP, são considerados como valores limites para a aceitação do pavimento e gatilho para uma intervenção $QI = 35 \text{ m/km}$ ($IRI = 2,7 \text{ m/km}$) e área de trincamento = 20%.

O cálculo do número estrutural foi realizado utilizando o modelo preconizado pela AASHTO 1993. Neste, o número estrutural corrigido (SNC) é um parâmetro associado à capacidade estrutural do pavimento, calculado a partir do número estrutural (SN) e do valor da resistência à penetração do subleito (CBR), tendo sido determinado conforme Queiroz (1981) e DNER (1985).

Na Tabela 7 tem-se os resultados relativos ao número estrutural corrigido a ser usado para definir a solução de restauração e conservação para o pavimento Tipo A.

Tabela 7 - Cálculo do número estrutural do pavimento Tipo A

COEFICIENTES ESTRUTURAIS			SN INDIVIDUAL			SN	SNC	PARÂMETROS DE ACEITABILIDADE DO PAVIMENTO		
a_1 (CBUQ)	a_2 (BGS)	a_3 (SB)	SN_1	SN_2	SN_3			$QI(m/km)$ <	%TR <	$D(0,01mm)$ <
0,17	0,07	0,03	2,60	1,40	0,81	4,81	5,86	35,0	20,0	49

Onde: D =Valor de deflexão admissível. %TR=porcentagem da área de trincamento no pavimento.
 QI =coeficiente de irregularidade. SN=número estrutural. SNC=número estrutural corrigido.

Com os dados obtidos através da aplicação ano a ano dos modelos de previsão de desempenho foram adotadas as soluções de restauração comumente empregadas em rodovias administradas por agências rodoviárias, onde são previstas intervenções em 50% da área do pavimento nas faixas de tráfego pesado e 10% nas faixas de tráfego leve. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Soluções de restauração – Pavimento Tipo A

Tipo de Serviço	Faixa	5º ano	10º ano	14º ano	17º ano	20º ano
Micro Concreto Asfáltico	Pesada	50%	50%	50%	50%	50%
	Leve	10%	10%	10%	10%	10%
Fresagem Contínua espessura = 2,0 cm	Pesada	50%	50%	50%	50%	50%
	Leve	10%	10%	10%	10%	10%
Pintura de Ligação	Pesada e Leve	60%	60%	60%	60%	60%
Recomposição CBUQ com polímero espessura = 3,0 cm	Pesada	50%	50%	50%	50%	50%
	Leve	10%	10%	10%	10%	10%

Além do serviço de restauração, são previstos serviços de conservação periódica para os pavimentos Tipo A e B, a serem executados a partir do 2º ano de operação da rodovia e abrangendo uma porcentagem da área total do pavimento conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Conservação periódica - Pavimento Tipo A e Tipo B

Tipo de serviço	2º ano	3º ano	4º ano	5º ano	A partir do 6º ano
Fresagem Descontínua e Recomposição em CBUQ	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%
Reparo Superficial	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%	0,5%
Reparo Profundo	0,02%	0,04%	0,06%	0,08%	0,10%

No Gráfico 1 e no Gráfico 2 têm-se as curvas de desempenho do pavimento, onde são considerados os parâmetros de irregularidade longitudinal (QI) e porcentagem de trincamento (TR) do pavimento Tipo A, ao longo dos 20 anos de análise.

Já para o pavimento Tipo B, é apresentado na Tabela 10 o cálculo do número estrutural corrigido a ser utilizado para definição dos períodos de restauração do pavimento.

Tabela 10 - Cálculo do número estrutural do pavimento Tipo B

COEFICIENTES ESTRUTURAIS				SN INDIVIDUAL				SN	SNC	PARÂMETROS DE ACEITABILIDADE DO PAVIMENTO		
a ₁ (CBUQ)	a ₂ (BGS)	a ₃ (BGTC)	a ₄ (SOLO)	SN ₁	SN ₂	SN ₃	SN ₄			QI(m/km) <	%TR <	D(0,01mm) <
0,17	0,07	0,22	0,03	1,91	0,70	3,74	0,54	6,89	7,93	35,0	20,0	49

De acordo com os dados obtidos através dos modelos de previsão de desempenho utilizados foram adotadas as soluções de restauração indicadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Soluções de restauração – Pavimento Tipo B

Tipo de Serviço	Faixa	5º ano	10º ano	15º ano	20º ano
Micro Concreto Asfáltico	Pesada	50%	50%	50%	50%
	Leve	10%	10%	10%	10%
Fresagem Contínua e = 2,0 cm	Pesada	50%	50%	50%	50%
	Leve	10%	10%	10%	10%
Pintura de Ligação	Pesada e Leve	60%	60%	60%	50%
Recomposição CBUQ com polímero e = 3,0 cm	Pesada	50%	50%	50%	10%
	Leve	10%	10%	10%	50%

No Gráfico 3 e no Gráfico 4 estão apresentadas as curvas de desempenho do pavimento no qual são considerados os parâmetros de irregularidade longitudinal e porcentagem de trincamento do pavimento Tipo B.

Gráfico 3 - Curvas de desempenho - QI/IRI – Pavimento Tipo B

Gráfico 4 - Curvas de desempenho - %FC2+FC3 – Pavimento Tipo B

Segundo Carvalho *et al.* (1994), a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) divide os defeitos dos pavimentos rígidos em dois tipos: os mais frequentes e os de

ordem funcional. Os defeitos mais frequentes são fissuras lineares e de canto, esborcinamento de juntas, placas divididas, quebras de canto e buracos.

A manutenção de um pavimento rígido pode ser preventiva, através de procedimentos que preservem a sua condição estrutural, retardando o processo de deterioração - a selagem de juntas e fissuras situam-se nesta categoria – ou pode consistir de reparações localizadas, capazes de restaurar a condição estrutural do pavimento.

Para o pavimento Tipo C são utilizadas apenas as soluções de conservação recomendadas pelo DNIT (2005b). Foram propostos serviços de selagem de juntas e trincas, a partir do segundo ano de uso da rodovia, iniciando-se em 0,5% da área total e somando-se 0,5% a cada ano, até atingir 2,5% da área no 6ºano, seguindo com essa taxa até o 20º ano.

O guia da AASHTO (1993) apresenta métodos de dimensionamento para reforço de pavimento flexíveis ou rígidos e o desempenho é medido através do índice de serventia. Para a pesquisa em questão, a solução para a conservação do pavimento de concreto foi adaptada aos métodos de restauração de pavimentos rígidos brasileiros, e os resultados podem ser verificados na Tabela 12 subsequente.

Tabela 12 - Conservação periódica - Pavimento Tipo C

Tipo de serviço	2º ano	3º ano	4º ano	5º ano	A partir do 6º ano
Selagem de juntas e trincas	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%

Para o 10º e 15º anos foram adotados os serviços de conservação apresentados na Tabela 13. Já no 20º ano será realizado o “*diamond grinding*”, também conhecido como micronivelamento ou cepilhamento, que é uma técnica tradicionalmente utilizada para a regularização de pavimentos de concreto.

Tabela 13 - Soluções de restauração - Pavimento Tipo C

Atividade ou serviço	10º ano	15º ano	20º ano
Selagem de juntas e fissuras	20%	-	-
Substituição de placas	-	2%	-
Cepilhamento	-	-	100%

Na Tabela 14 é apresentado o resumo das soluções de conservação periódica e restauração adotadas para os três tipos de pavimento em análise.

Tabela 14 - Resumo das soluções de conservação periódica e restauração para pavimentos propostos

Pavimento	Ano de Intervenção																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tipo A																				
Tipo B																				
Tipo C																				

Legenda

- Micro Concreto Asfáltico + Fresagem Contínua e=2,0 cm + Recomp. CBUQ c/ Pol. e=3,0cm
- Fresagem Descontínua e Recomposição em CBUQ * + Reparo Superficial** + Reparo Profundo***
- Selagem de Juntas + Trincas (20%)
- Substituição das Placas (2%)
- Cepilhamento (100%)
- Selagem de juntas e trincas ****

* 0,5% no 2º ano, 1,0% no 3º ano, 1,5% no 4º ano, 2,0% no 5º ano e 2,5% a partir do 6º ano.

** 0,1% no 2º ano, 0,2% no 3º ano, 0,3% no 4º ano, 0,4% no 5º ano e 0,5% a partir do 6º ano.

*** 0,02% no 2º ano, 0,04% no 3º ano, 0,06% no 4º ano, 0,08% no 5º ano e 0,1% a partir do 6º ano.

**** 0,5% no 2º ano, 1,0% no 3º ano, 1,5% no 4º ano, 2,0% no 5º ano e 2,5% a partir do 6º ano.

3.3. Metodologia do trabalho

Para os três tipos de pavimentos avaliados foi estipulado o período de análise, onde todos os custos foram observados. Cabe mencionar que este período deve ser suficientemente longo para refletir o custo em longo prazo e, geralmente, precisa ser maior que o de vida útil do pavimento. Para tanto, foram definidos os intervalos de conservação e restauração, mantendo a qualidade e serventia dos pavimentos até o final do ciclo. A definição das estruturas apresentadas foi constituída pelos materiais de pavimentação mais comumente utilizados no Brasil, cujas características físicas e mecânicas cumprem os requisitos solicitados pelo manual do DNIT (2006a).

No presente trabalho não foi considerado o consumo adicional de combustível devido aos atrasos de viagem mediante fechamento de faixas para serviços de conservação ou restauração, pois será admitido que esses serviços ocorrerão no período noturno, onde o volume de tráfego de veículos é reduzido.

O limite de velocidade nos trechos que sofrerão influência das obras de restauração será reduzido de 100 km/h para uma velocidade de zona de trabalho de 65 km/h, segundo Vasconcellos (2006), com velocidades acima de 60 km/h, o consumo de combustível para a frota analisada tende a se estabilizar em 10 km/l.

Ademais, foi avaliado o consumo suplementar de combustível devido ao aumento da irregularidade da superfície do pavimento (IRI), uma vez que irá resultar em acréscimo de emissões de GEE na atmosfera.

Sob estes cenários, foi aplicada a ferramenta LCA para as estruturas propostas, onde foram calculadas as quantidades de energia consumida, bem como as emissões de GEE para a produção, transporte e aplicação dos materiais na implantação, conservação e restauração da rodovia durante o período de vida útil. Os dados de gasto de energia e emissões de GEE foram computados com o auxílio do *software Simapro* e do banco de dados Ecoinvent®, além de dados de literaturas utilizadas.

Os processos considerados para o estudo de caso foram as emissões geradas a partir da energia consumida durante o processo de produção das matérias primas, transporte dos materiais, serviços de terraplenagem e construção das camadas. A partir daí, foram realizadas análises comparativas para verificar quais aspectos

causam maior impacto ao meio ambiente, em função da distância de transporte, gasto energético e emissões de GEE.

Após a análise LCA foi elaborada a avaliação LCCA, no qual foram estimados os custos de implantação do pavimento, bem como os custos para sua conservação periódica e restauração durante o período de estudo, utilizando valores de custos unitários atualmente praticados pelo DNIT.

Assim, a metodologia LCCA empregada nesta dissertação se baseia na publicação de Walls e Smith (1998), que aborda de forma abrangente e detalhada todo o processo de análise.

A metodologia proposta está apresentada passo-a-passo, de maneira sequencial, nos Anexos A a L, podendo ser utilizada em estudos futuros.

3.3.1. Definição dos pavimentos a serem analisados

Para a aplicação das análises foram então selecionadas as alternativas de pavimentos propostas, onde as estruturas adotadas têm como premissa principal atender ao tráfego previsto na rodovia, de maneira compatível com a capacidade de suporte do subleito local.

O desempenho do pavimento ao longo da sua vida de serviço e as atividades de conservação periódica e restauração posteriores à implantação causam grande impacto nos resultados de LCA. Isto porque afeta-se diretamente a frequência de intervenção que, por sua vez, interfere nos custos à administração rodoviária, além de impactar os usuários durante os períodos de atividades de conservação e restauração.

Para tanto, neste trabalho foi analisado o período de vida útil de cada alternativa de pavimento e, com base em soluções sugeridas, são realizadas estimativas de intervalos referentes à conservação periódica dos pavimentos propostos ao longo do seu ciclo de vida (WALLS e SMITH, 1998).

3.3.2. Metodologia LCA

Neste estudo o resultado geral para uma LCA de um pavimento apresenta um inventário ambiental e os impactos causados por cada etapa de análise. Assim, os indicadores ambientais incluem consumo de energia, potencial de aquecimento global, emissões de poluentes do ar e emissões de poluentes da água.

Para a análise de inventário foram incluídos dados de emissões, consumo de energia para produção da matéria-prima e serviços básicos de pavimentação. Alguns outros parâmetros, tais como emissões de ruídos, não estão incluídos no modelo atual criado, podendo este último ser objeto de estudos futuros.

A coleta dos dados de entrada é criteriosa e estes sempre são comparados com bases de dados de literaturas conceituadas na área, como Stripple (2001), Zhang *et al.* (2008), Kendall (2004 e 2012), Keioleian e Spitzley (2006) que, sempre que possível, utilizam dados obtidos a partir de obras e serviços já realizados e monitorados.

Todas as fases, inclusive a de transporte, estão representadas e são consideradas para o cálculo da quantidade de emissões conforme Figura 8.

Figura 8 – Relação entre componentes de uma análise LCA

Fonte: Zhang *et al.* (2007)

O primeiro módulo, denominado produção de matéria-prima, consiste das atividades de extração e produção de materiais granulares para reforço do subleito, produção de materiais britados para sub-base e base do pavimento, produção de ligante asfáltico, produção de cimento e produção de materiais complementares. Todos esses dados de entrada irão fornecer dados de saída quantificados como produto, resíduo ou emissão. No caso do presente trabalho, a fase foi modelada usando conjuntos de dados coletados a partir de fontes bibliográficas, de fabricante de equipamentos, SICRO 2 – DNIT além de banco de dados da Ecoinvent®.

A elaboração do inventário leva ao conhecimento detalhado do processo de produção. Com isto, pode-se identificar pontos de produção de resíduos e sua destinação, bem como as quantidades de material que circulam e que deixam o sistema, determinando a poluição associada a uma unidade do sistema e identificando pontos críticos de desperdício de matéria-prima ou de produção de resíduos (RIBEIRO *et al.*, 2007).

O segundo módulo compreende todas as atividades realizadas através de equipamentos durante o período de construção, e também conservação e restauração da rodovia. Deste modo, abrange maquinários desde as atividades de limpeza do terreno e terraplenagem (motoniveladoras, pá carregadeiras, escavadeiras, rolos compactadores, etc.), até equipamentos e serviços de pavimentação (usina de asfalto, espargidores, rolos compactadores, vibroacabadoras, etc.). Dentro deste contexto, para verificar a produtividade de cada equipamento para a execução de cada atividade foi utilizado o SICRO 2 – São Paulo (Sistema de Custos Rodoviários – RCTR0320) do DNIT, com data de referência de março de 2016.

Cabe mencionar que o SICRO 2 não é uma simples tabela de preços, mas um levantamento que traz um conjunto de variáveis, onde a metodologia de formação de preços considera a grande variação regional e temporal desses valores, em função da disponibilidade dos insumos e das distâncias dos centros de produção, além de fatores econômicos como a demanda gerada pelo nível de investimento em obras da região, conforme indicado no Manual de Custos Rodoviários do DNIT (2003). Ademais, o uso do SICRO 2 também permite observar a taxa de produtividade de cada equipamento empregado.

O Manual DNIT (2003) descreve detalhadamente o equipamento, assim como o fabricante, a indicação de sua potência e tipo de combustível que utilizam.

Esta fase de análise também compreende o levantamento e registro das características construtivas, mecânicas e operacionais, bem como os períodos de uso produtivo e improdutivo. Para tanto, essas informações foram recolhidas junto a fabricantes e usuários dos materiais e equipamentos.

O terceiro módulo é composto pelo transporte de todos os materiais do seu local de produção para o canteiro, onde posteriormente será usinado e transportado para a pista, além do transporte dos resíduos para bota-fora, que é realizado por caminhões e veículos de manutenção, onde cada ciclo de viagem considera que o caminhão parte carregado da origem e retorna vazio.

O quarto módulo refere-se ao tempo adicional gasto pelos usuários, devido aos atrasos que ocorrerão nos percursos de viagens durante as obras de restauração da rodovia, aos quais também são atribuídos os custos aos usuários para riscos de acidentes. Cabe mencionar que as alterações no fluxo de tráfego (tempos de congestionamento e velocidade dos veículos durante o congestionamento) serão estimadas mediante consulta às bibliografias utilizadas.

O quinto módulo é o período de operação e uso da rodovia. Nessa fase são computados os gastos de combustível excedentes que virão a ocorrer devido à perda de serventia ou deterioração da rodovia (evolução do IRI). Esse efeito interfere no tempo de viagem dos usuários, aumentando o consumo de combustível e elevando as emissões de poluentes para a atmosfera.

Para o cálculo da estimativa de consumo de combustível são adotados alguns parâmetros de forma a classificar simplificada a idade e as características da frota de veículos da região onde será implantada a rodovia. Os dados usados na presente pesquisa fazem parte do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011).

No trabalho em questão não foi avaliado o fim da vida útil do pavimento, pois ao final do período de análise (20 anos) a agência de administração rodoviária deverá manter a rodovia em condições de uso (conforme editais de serviço de conservação da

ARTESP), considerando que no 20º ano será realizada uma campanha de restauração para cada pavimento em questão. Dessa forma, para a fase final (vida útil do pavimento) foi computado o valor residual do empreendimento após o período avaliado.

Cabe ainda mencionar que no presente trabalho os dados de entrada e saída de cada parâmetro utilizado são observados levando-se em conta o consumo de material, energia e os impactos ambientais resultantes do sistema ao longo do período de análise.

Por fim, esta pesquisa traz ainda uma avaliação comparativa do projeto, onde já com os resultados obtidos foi possível verificar o consumo de energia, emissões de GEE, geração de resíduos sólidos e potencial de aquecimento global.

3.3.3. Metodologia LCCA

A ideia da utilização da ferramenta LCCA é que o investimento em infraestrutura de transporte rodoviário deve levar em conta todos os custos incorridos durante o período de vida da rodovia, considerando-se que as agências rodoviárias devem fornecer o serviço por muitos anos e que a habilidade para a prestação desse serviço durante esse longo tempo está baseada na sua capacidade em manter a rodovia adequadamente.

Sendo assim, a decisão de investimento irá conter não só o investimento inicial, mas também todas as futuras atividades que serão necessárias para manter esse investimento disponível para o público. Essas atividades futuras fazem parte de alternativas que, tanto quanto as decisões da alternativa inicial, são relevantes para o uso continuado ao público. Dentro deste contexto, as atividades de manutenção são, em grande parte, ditadas pela alternativa inicial selecionada (USDOT, 2008).

Dessa forma no presente trabalho será idealizada a combinação da melhor técnica com o melhor custo-benefício. Além disso, o período de análise será extenso o suficiente (20 anos) para incorporar pelo menos uma atividade de reabilitação e também de manutenção. Com isto, ao final do período de análise pode ser computado o valor residual do pavimento.

Os custos considerados na LCCA incluíram aqueles que, para as agências rodoviárias e usuários do sistema viário, resultassem da construção e atividades de manutenção, sem exigir que todos os valores associados de cada alternativa fossem calculados, mas somente aqueles que demonstrem diferenças entre cada uma das alternativas devem ser explorados. Esta é uma distinção importante, pois pode simplificar muito os requisitos de avaliação de dados. No caso dos custos da agência, isto significa, por exemplo, que as atividades de reabilitação devem ser incluídas, mas as despesas que são comuns a todas as alternativas (por exemplo, limpeza do terreno, terraplenagem, drenagem, sinalização) podem ser removidos da análise, pois não irão interferir no resultado final comparativo. (USDOT, 2008).

Ainda com relação à agência rodoviária, também foram considerados os custos relativos à conservação dos pavimentos, que contempla um conjunto de serviços destinados à preservação daqueles, nas condições em que ficaram após a construção inicial ou restauração (DNIT, 2006b). Esses serviços de conservação ocorrem ao longo da vida útil da rodovia e aumentam com o decorrer dos anos, à medida que o pavimento se deteriora. Como exemplo, tem-se a conservação rotineira - preventiva, tapa-buracos, selagens, recapeamentos e restaurações, tanto dos pavimentos, quanto das pontes, túneis, taludes e outros.

Já os custos para os usuários das rodovias que são aqueles diferenciais computados entre operações de viagens normais e operações de viagens com o pavimento em condições degradadas, sendo um conjunto dos valores atribuídos aos custos por atrasos de viagens, à operação dos veículos, gastos com combustíveis e também ao aumento nos riscos de acidentes devido ao tráfego em zonas de trabalho (WILDE *et al.*, 2001).

Para os custos totais de viagens foi usado o conceito de Walls e Smith (1998), no qual os custos totais de viagens são determinados multiplicando-se o valor do tempo adicional gasto em congestionamentos, trechos em obras ou em desvios, em comparação com o tempo gasto em um fluxo de tráfego em condições normais, em função do tempo (taxa ou custo de atraso) para o usuário, veículos e caminhões. Segundo a FHWA, a estimativa do custo do tempo de atraso do usuário é U\$11,58 (veículo x hora), do veículo leve é U\$18,54 (veículo x hora) e dos caminhões é U\$22,31 (veículo x hora), respectivamente. Os custos estão em dólares de 1996,

tendo sido atualizados em 2006 sob o Índice de Preços ao Consumidor (WALLS e SMITH, 1998).

Para o trabalho em questão para verificar a viabilidade econômica e financeira foi utilizado o método do valor presente líquido (VPL), uma vez que este é muito usado pela simplicidade da sua aplicação (SANTOS, 2011). Este apresenta as vantagens de ser direto e de assegurar a maximização de benefícios sociais líquidos (DNIT, 2006b). O objetivo desse método é o de transformar todos os custos e benefícios acumulados ao longo do período de análise nos custos atuais.

O VPL é a ferramenta mais empregada pelas grandes empresas na análise de investimentos (COPELAND e ANTIKAROV, 2001) e consiste em calcular o valor presente dos demais termos do fluxo de caixa para somá-los ao investimento inicial, utilizando uma taxa mínima de atratividade para descontar o fluxo (CASAROTTO FILHO e KOPITKE, 2000).

Para a aplicação do método é necessário:

- Determinar todos os custos e benefícios no período n , incluindo o valor residual;
- Definir a taxa de atualização t , a ser usada;
- Avaliar o período de vida para as diferentes alternativas.

Inicialmente, determina-se o fator do valor atual, conforme a equação (1). Já o método aplicado aos custos pode, então, assumir a equação (2).

$$FVA_{t,n} = \frac{1}{(1+t)^n} \quad (1)$$

Onde:

- $FVA_{t,n}$ = fator do valor atual, para um dado t e n ;
- t = taxa de atualização;
- n = número de anos do período em análise.

$$TVPL_{x1,n} = (ICC)_{x1} + \sum_{i=0}^n VPL_{t,n} \left[(CC)_{x1,i} + (MO)_{x1,i} + (UC)_{x1,i} \right] - (SV)_{x1,i} \times FVA_{t,n} \quad (2)$$

Onde:

- $TVPL_{x1,n}$ = valor presente líquido total para a alternativa $x1$, para um período de análise de n anos;
- $(ICC)_{x1}$ = custo inicial de construção para a alternativa $x1$;
- $(CC)_{x1,i}$ = custo de construção para a alternativa $x1$, no ano i , quando i é menor que n ;
- $(MO)_{x1,i}$ = custo de conservação para a alternativa $x1$, no ano i ;
- $(UC)_{x1,i}$ = custos para o usuário (incluindo custo de operação dos veículos, custo do tempo de percurso, custo de acidentes e desconforto) para a alternativa $x1$, no ano i ;
- $(SV)_{x1,i}$ = valor residual para a alternativa $x1$, no fim do período de análise, em n anos.

Laponni (1996) recomenda em projetos que exigem mais de um ano de desembolso (como é o caso de pavimentação), o emprego da expressão geral do VPL, sem considerar o elemento “benefícios”, que envolve receitas e despesas. Adler (1978), por outro lado, enfatiza que os benefícios são de difícil aferição, embora de obtenção direta, como é o caso do atributo conforto ao usuário ou o parâmetro tempo de viagem, ou ainda o atributo desgaste do veículo. Dessa forma, na presente pesquisa não se levará em conta o atributo benefícios para a definição da melhor alternativa de pavimento, mas aquela com o menor valor de VPL.

A taxa de desconto (taxa mínima de atratividade ou taxa de interesse) é expressa numa taxa de juros compostos que representa o grau de interesse ou atração que o dinheiro merecerá no futuro. Ela é utilizada para descontar valores futuros esperados para o projeto, em termos de valor presente. Também é empregada indiretamente como padrão de comparação no método da taxa interna de retorno. Nos países ditos desenvolvidos este valor varia entre 4 a 8% ao ano. Nos países em desenvolvimento os valores mais usuais estão entre 10 e 12% ao ano (DNIT, 2006b).

O valor residual (terminal ou de resgate) representa o valor monetário atribuído ao pavimento ao final do período de análise (DNIT, 2006b). Seu cálculo pressupõe a valorização monetária, quando da reciclagem da estrutura de pavimento existente, no

final do período de avaliação. Dentro deste contexto, o valor residual de cada pavimento é dado pela equação (3).

$$VR = C \times \frac{(A - P)}{20} \quad (3)$$

Onde:

- C = custo da intervenção estrutural do pavimento;
- A = ano da próxima intervenção estrutural do pavimento (ano da intervenção estrutural do pavimento + 20 anos);
- P = período de análise (20 anos).

Sob estas condições, o objetivo final para a aplicação da LCCA à pavimentação é o de encontrar a alternativa de pavimento que atenda aos requisitos de desempenho, com o menor custo de ciclo de vida (WALLS e SMITH, 1998).

3.3.4. Integração LCA-LCCA

Depois de concluídas as análises, todos os resultados foram submetidos a uma avaliação comparativa para determinar a influência dos dados de entrada, premissas, projeções e estimativas sobre os resultados. A avaliação comparativa para o presente trabalho foi conduzida usando como variáveis principais os custos de implantação e conservação para as três alternativas de pavimento propostas.

Cabe mencionar que, embora os pontos de vista do conforto ambiental e econômico sejam igualmente importantes, ambos são singulares e de difícil comparação.

Uma forma de observar e integrar os resultados das duas análises é a utilização do método para a tomada de decisão multicritérios. Para o trabalho em questão foi usado o *Analytic Hierarchy Process* – AHP, que se trata de um método multiatributos para auxiliar na tomada de decisões complexas, justificando a escolha, através da determinação dos critérios e seus pesos, a partir das preferências dos tomadores de decisão. Esse método foi desenvolvido na década de 70 pelo Prof. Thomas Saaty, baseado em conceitos de matemática e psicologia e, ainda que existem várias críticas

a ele (Dyer, 1990), principalmente no que tange à escala de preferências, trata-se de um método bastante usado.

Na Figura 9 é apresentado o fluxograma e procedimento para utilização do método AHP na presente pesquisa.

Figura 9 - Hierarquia de critérios AHP empregada na presente pesquisa

O método AHP consiste em identificar as alternativas possíveis e os atributos significantes da decisão, cujos critérios consistem em determinar a significância dos atributos que serão analisados e pontuados para cada alternativa. Assim, os atributos são hierarquizados ou priorizados de acordo com sua maior relevância ou importância para a decisão.

Para cada atributo e cada par de alternativas, os tomadores de decisão indicam suas preferências. Em seguida, as comparações entre os atributos e as alternativas são registradas em matrizes na forma de frações entre 1/9 e 9. Cada matriz é observada pelo seu autovalor, de forma a verificar a coerência dos julgamentos e, por fim, calculam-se valores globais de preferência para cada alternativa.

Uma vez calculados os valores presentes líquidos para cada alternativa e realizada a avaliação comparativa, é dado um passo atrás e feita a reavaliação do projeto, comparando estratégias. No caso da análise de custo do ciclo de vida, o benefício global não é necessariamente o resultado por si só, mas sim a possibilidade de

utilização dessa informação resultante para modificar as alternativas propostas e desenvolver estratégias economicamente efetivas.

Já no caso da LCCA os resultados são apenas um dos muitos fatores que influenciam a seleção final de um pavimento. A decisão final pode incluir outros aspectos adicionais fora da LCCA, como a política local, a disponibilidade de financiamento, ou a capacidade e experiência das empresas para realizar a construção de um pavimento em particular. Cabe mencionar que o resultado final da LCCA está relacionado à precisão dos insumos utilizados, e isso depende diretamente da capacidade do analista em prever com precisão tais variáveis (WALLS e SMITH, 1998).

Na Figura 10 subsequente é apresentado o fluxograma da metodologia aplicado no presente trabalho.

Figura 10 - Metodologia de desenvolvimento do presente trabalho

3.4. Análise do ciclo de vida (LCA)

3.4.1. Definição de objetivo e escopo da LCA

Neste item é desenvolvida a avaliação para três tipos estruturas de pavimento em longo prazo, simulando os impactos causados pela construção e operação da rodovia: economia, danos ao ambiente, danos aos usuários. Portanto, ao final da LCA será possível:

- Chegar às etapas de um processo de avaliação do ciclo de vida para as fases de construção, operação e conservação de uma rodovia;
- Identificar e quantificar os principais componentes que impactam o ambiente durante o período de construção, conservação e uso de uma rodovia;
- Estruturar uma metodologia de análise para o processo de construção, operação e conservação de estradas.

3.4.2. Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

Na presente pesquisa o inventário foi elaborado para cada estrutura proposta de pavimento, segundo os fluxogramas apresentados na Figura 11, na Figura 12 e na Figura 13.

Figura 11 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo A

continua

continuação Figura 11

continuação Figura 11

Figura 12 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo B

continuação Figura 12

continuação Figura 12

Figura 13 - Fluxograma do ciclo de vida - Pavimento Tipo C

continua

continuação Figura 13

3.4.3. Princípios de cálculo

Foi efetuado todo o levantamento quantitativo de materiais e serviços necessários para a implantação, conservação e restauração da rodovia ao longo do período de análise da rodovia, levando-se em consideração as três alternativas de pavimento propostas. Na Tabela 15 são apresentadas as quantidades de serviços necessários para a construção inicial da rodovia.

Tabela 15 – Quantidades de serviços para construção inicial

Serviço	Un	Tipo A	Tipo B	Tipo C
"Binder" tipo CBUQ - faixa B	t	34.560	20.736	-
Pintura de ligação	m ²	432.000	288.000	-
Imprimação	m ²	144.000	144.000	-
CBUQ com polímero - faixa C – capa de rolamento	t	17.280	17.280	-
Base de BGS	m ³	28.800	17.280	21.600
Base de BGTC com 4% cimento	m ³	-	24.480	-
Reforço do subleito (solo)	m ³	-	28.800	-
Base estabilizada granulometricamente - mistura Solo-brita (50/50)	m ³	43.200	-	-
Sub-base de CCR	m ³	-	-	17.280
Concreto de cimento Portland com fôrma deslizante	m ³	-	-	36.000

Já para as soluções de conservação e restauração das alternativas propostas foram obtidas as quantidades indicadas na Tabela 16 subsequente. A partir dos levantamentos de quantidades e da utilização dos dados disponíveis no SICRO 2, foi obtida a tabela de quantidades de materiais e com o conhecimento do peso específico desses materiais obteve-se a quantidade em toneladas (t) de material para cada um dos pavimentos analisados.

Tabela 16 - Quantidades de serviços para serviços de conservação periódica e restauração dos pavimentos

Serviço	Un	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Microrrevestimento a frio - 1,5 cm	m²	216.000	172.800	-
Pintura de ligação	m²	279.666	236.466	-
Imprimação	m²	1.926	1.926	-
CBUQ - capa rolamento	t	18.284	15.692	-
Base de BGS	m³	289	289	-
Fresagem contínua do revestimento betuminoso	m³	5.047	4.327	-
Fresagem mecânica de pavimento de concreto	m²	-	-	144.000
Recomposição de placa de concreto	m³	-	-	720
Limpeza e enchimento junta pavimento de concreto	m	-	-	129.600

3.4.3.1. Módulo 1 – Produção das matérias-primas

Para a elaboração e organização dos dados do primeiro módulo da pesquisa foram computadas todas as quantidades de serviços necessários para cada tipo de pavimento analisado e com o auxílio do item c (material) do SICRO 2, foram definidas as quantidades de matérias-primas necessárias para a construção inicial da rodovia, para os serviços de conservação periódica e para os serviços de restauração da rodovia. A quantidade de matérias-primas para cada pavimento analisado encontra-se na Tabela 17 subsequente.

Tabela 17 - Quantidades de matérias-primas para cada pavimento analisado

Serviço	Quantidade matéria-prima (t)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Óleo combustível	476.846	365.217	-
CAP 50/70	1.728	1.037	-
CAP 65/90 modificado por polímero SBS	2.962	2.677	-
Fornecimento de imprimação CM 30	175	175	-
Fornecimento de pintura de ligação RR 1C	285	210	-
Cimento Portland CP II-32 (a granel)	-	2.448	15.754
Areia lavada	17.903	12.230	52.963
Fíler	1.714	1.539	-
Baguete limitador de polietileno	-	-	119
Selante asfáltico polimerizado	-	-	30
Aço CA-25	-	-	145
Aço CA-50	-	-	88
Brita 1, 2 e 3	242.879	205.550	211.473

Onde: CAP = Cimento asfáltico de petróleo; SBS = Estireno-Butadieno-Estireno

Para o cálculo do consumo de energia primária para a produção das matérias-primas são consideradas as quantidades de trabalho necessárias para a produção de cada insumo. A contribuição das diferentes fontes de energia (em MJ) e a confiabilidade desses dados devem ser levadas em conta para a realização dos cálculos (STRIPPLE, 2001). Embora a unidade MJ represente quantidade de trabalho efetuado, nessa pesquisa manteremos a denominação conforme os trabalhos de LCA pesquisados, que têm em conta essa unidade como energia primária consumida.

A partir das quantidades obtidas foram atribuídos a todos os materiais os montantes de energia primária consumida (MJ/t para a produção dos materiais) necessários a cada processo de construção.

Multiplicando-se as quantidades de matéria-prima pela quantidade de energia utilizada para a sua produção são obtidas as quantidades de energia primária total consumida para a produção das matérias primas-empregadas, conforme equação (4).

$$QE_{total} = QE_{unitário} \times Q_{matéria-prima} \quad (4)$$

Onde:

- $QE_{unitário}$ = energia consumida por unidade de matéria-prima produzida;
- $Q_{matéria-prima}$ = quantidade total de matéria-prima necessária;
- QE_{total} = energia consumida total para a produção da matéria-prima necessária.

Na Tabela 18 são apresentadas as quantidades de energia total consumidas, que foram calculadas conforme quantidades de serviços para cada pavimento analisado.

Tabela 18 - Quantidades de energia primária consumida por tipo de pavimento

Serviço	Quant. energia (MJ/t)	Quantidade de energia (GJ)		
		Tipo A	Tipo B	Tipo C
Óleo combustível	0,1	48	37	-
CAP 50/70	682	1.179	707	-
CAP 65/90 modificado por polímero SBS	724	1.416	1.313	-
Fornecimento de imprimação CM 30	50	173.470	173.470	-
Fornecimento de pintura de ligação RR 1C	50	173.476	115.652	-
Cimento Portland CP II-32 (a granel)	5.161	-	12.635	81.307
Areia lavada	96	1.716	1.172	5.077
Fíler	5.161	8.839	7.940	-
Baguete limitador de polietileno	91.550	-	-	10.915
Selante asfáltico polimerizado	50	-	-	2
Aço CA-25	25.310	-	-	3.677
Aço CA-50	25.310	-	-	2.217
Brita 1, 2 e 3	96	23.283	19.705	20.272
Total		383.427	332.630	123.468

Com as quantidades totais de materiais calculados, e com os potenciais de emissões obtidas através de bancos de dados da Ecoinvent[®], para cada material produzido é possível a obtenção das quantidades de GEE total para cada material conforme equação (5) e também conforme apresentado na Tabela 19.

$$Q_{GEEtotal} = Q_{matéria-prima} \times Q_{GEEunitário} \quad (5)$$

Onde:

- $Q_{GEEunitário}$ = quantidade de emissões por unidade de matéria-prima produzida;
- $Q_{matéria-prima}$ = quantidade total de matéria-prima necessária;
- $Q_{GEEtotal}$ = total de emissões para a produção da matéria-prima necessária.

Tabela 19 - Quantidades de emissões de GEE para matérias-primas

Serviço	CO ₂ (t)			N ₂ O (kg)			CH ₄ (kg)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Óleo combustível	2	1	-	-	-	-	-	-	-
CAP 50/70	59	36	-	0,10	0,06	-	0,02	0,01	-
CAP 65/90 modificado por polímero SBS	67	62	-	0,01	0,01	-	0,00	0,00	-
Fornecimento de imprimação CM 30	31	31	-	0,01	0,01	-	0,04	0,04	-
Fornecimento de pintura de ligação RR 1C	51	37	-	0,01	0,01	-	0,06	0,05	-
Cimento Portland CP II-32 (a granel)	-	1.974	12.705	-	0,40	2,58	-	0,13	0,86
Areia lavada	27	18	79	0,08	0,05	0,22	0,69	0,47	2,03
Fíler	1.381	1.241	-	0,28	0,25	-	0,09	0,08	-
Baguete limitador de polietileno	-	-	131	-	-	-	-	-	-
Selante asfáltico polimerizado	-	-	5	-	-	0,00	-	-	0,01
Aço CA-25	-	-	321	-	-	0,43	-	-	1.325
Aço CA-50	-	-	194	-	-	2,67	-	-	799
Brita 1, 2 e 3	363	307	316	1,02	0,86	0,89	9,33	7,89	8,12
Total	1.981	3.708	13.751	1,50	1,65	10,80	10,23	8,68	2.135

De acordo com os valores obtidos pode-se verificar que o pavimento Tipo C é, dentre os três, o maior contribuinte em relação às emissões de CO₂ na atmosfera, o que se deve à grande quantidade de cimento usada na sua composição (mais de 15.000 t). Ainda, a utilização de barras de aço nas juntas deste pavimento, embora seja em uma quantidade relativamente pequena (pouco mais de 200 t), desempenha um grande papel na contribuição com as emissões de CO₂, N₂O e CH₄.

3.4.3.2. *Módulo 2 – Equipamentos e construção*

Conforme dados de levantamentos de quantidades, foi elaborada a Tabela 20 na qual estão apresentadas as quantidades de horas de equipamentos a serem usados, que foram obtidos a partir do lançamento das quantidades de serviços no SICRO 2. As quantidades indicadas são especificamente para a construção inicial da rodovia.

Tabela 20 - Quantidades de horas de equipamentos na construção

Serviço	Horas (h)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Trator de esteiras com lâmina	333	11.178	-
Motoniveladora	300	394	104
Trator agrícola	645	613	99
Carregadeira de pneus - 3,3 m ³	1.479	906	728
Rolo compactador – pé-de-carneiro	546	361	189
Carregadeira de pneus - 1,91 m ³	75	53	189
Escavadeira hidráulica - com esteira - capacidade 600L para longo alcance	152	104	450
Rolo Compactador - tandem vibratório autopropelido 10,2 t	718	647	235
Rolo compactador de pneus - 25 t	1.083	864	376
Usina misturadora de solos 300 t/h	599	147	179
Distribuidor de agregados - autopropelido	503	142	175
Equipamento de distribuição de asfalto - montado em caminhão	552	441	-
Aquecedor de fluido térmico	1.179	925	-
Usina de asfalto a quente - 90/120 t/h com filtro de manga	935	716	-
Vibroacabadora de asfalto - sobre esteiras	757	580	-
Fresadora e distribuidora de solo - para regularizar subleito	-	58	41
Compressor de ar - 200 PCM	-	-	168
Conjunto de britagem - 80 m ³ /h	1.952	1.298	1.335
Espalhadora de concreto	-	-	140
Acabadora de concreto com forma deslizante	-	-	140
Texturizadora e lançadora	-	-	51
Serra de disco diamantado	-	-	174
Seladora de juntas	-	-	68
Central de concreto - 180m ³ /h - dosadora e misturadora		164	358
Caminhão basculante - 10 m ³ - 15 t	1.915	1.559	536
Caminhão tanque 10.000 L	730	528	421
Caminhão espargidor - tanque 6000 L	-	-	155
Grupo gerador - 36/40 kVA	935	716	-
Grupo gerador - 164 / 180 kVA	1.534	863	179
Grupo gerador - 288 kVA	1.952	1.462	1.693

Para a obtenção dos valores totais de energia por equipamento é utilizada a equação (6) e na Tabela 21 subsequente são apresentadas as quantidades de energia primária consumidas pelos equipamentos.

$$E_{total} = E_{primária} \times Q_{horas} \times 3,6 \quad (6)$$

Onde:

- E_{total} = energia primária consumida pelo equipamento em MJ;
- $E_{primária}$ = quantidade de energia consumida por hora de equipamento em kW/h;
- Q_{horas} = quantidade de utilização em horas de equipamento em h;
- 3,6 = fator de conversão.

Tabela 21 - Quantidade de energia primária consumida por equipamentos na construção

Serviço	Quantidade de energia primária (GJ)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Trator de esteiras - com lâmina	129	4.346	-
Motoniveladora	73	108	-
Trator agrícola	145	137	-
Carregadeira de pneus - 3,3 m³	783	479	385
Rolo compactador – pé-de-carneiro	105	51	-
Carregadeira de pneus - 1,91 m³	31	22	77
Escavadeira hidráulica - com esteira - capacidade 600 L para longo alcance	56	39	167
Rolo compactador - tandem vibratório autopropelido 10,2 t	212	191	69
Rolo compactador de pneus - 25 t	330	253	81
Usina misturadora de solos 300 t/h	214	52	64
Distribuidor de agregados - autopropelido	187	53	65
Equipamento de distribuição de asfalto - montado em caminhão	347	278	-
Aquecedor de fluido térmico	51	40	-
Usina de asfalto a quente - 90/120 t/h com filtro de manga	633	485	-
Vibroacabadora de asfalto - sobre esteiras	224	171	-
Fresadora e distribuidora de solo - para regularizar subleito	-	50	36
Compressor de ar - 200 PCM	-	-	34
Conjunto de britagem - 80 m³/h	1.940	1.289	1.327
Espalhadora de concreto	-	-	87
Acabadora de concreto com forma deslizante	-	-	103
Texturizadora e lançadora	-	-	10
Serra de disco diamantado	-	-	6
Seladora de juntas	-	-	1
Central de concreto - 180m³/h - dosadora e misturadora	-	88	192
Caminhão basculante - 10 m³ - 15 t	1.448	1.179	405
Caminhão tanque 10.000 L	412	259	178
Caminhão espargidor - tanque 6000 L	-	-	76
Grupo gerador - 36/40 kVA	108	82	-
Grupo gerador - 164 / 180 kVA	795	448	93
Grupo gerador - 288 kVA	1.616	1.211	1.402
Total	9.839	11.309	4.857

Para o cálculo das emissões de GEE para equipamentos foi utilizada a metodologia simplificada do IPCC e comparados com o banco de dados empregado por Stripple (2001). Considerou-se que os equipamentos que usam diesel como combustível os valores de emissões de GEE são 79 g/MJ para CO₂ e para N₂O e CH₄, 0,0016 g/MJ e 0,00005 g/MJ respectivamente. Os resultados encontram-se exibidos na Tabela 22.

Tabela 22 - Emissões referentes ao uso de equipamentos na construção

Serviço	Emissões								
	CO ₂ (t)			N ₂ O (kg)			CH ₄ (kg)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Trator de esteiras - com lâmina	10	343	-	0,21	6,95	-	0,01	0,22	-
Motoniveladora	6	9	-	0,12	0,17	-	0,00	0,01	-
Trator agrícola	11	11	-	0,23	0,22	-	0,01	0,01	-
Carregadeira de pneus - 3,3 m ³	62	38	30	1,25	0,77	0,62	0,04	0,02	0,02
Rolo compactador – pé-de-carneiro autopropelido - 11,25 t vibratório	8	4	-	0,17	0,08	-	0,01	0,00	-
Carregadeira de pneus - 1,91 m ³	2	2	6	0,05	0,03	0,12	0,00	0,00	0,00
Escavadeira hidráulica - com esteira - capacidade 600 L para longo alcance	4	3	13	0,09	0,06	0,27	0,00	0,00	0,01
Rolo compactador - tandem vibratório autopropelido 10,2 t	17	15	5	0,34	0,31	0,11	0,01	0,01	0,00
Rolo compactador de pneus autopropelido 25 t	26	20	6	0,53	0,40	0,13	0,02	0,01	0,00
Usina misturadora de solos 300 t/h	17	4	5	0,34	0,08	0,10	0,01	0,00	0,00
Distribuidor de agregados - autopropelido	15	4	5	0,30	0,08	0,10	0,01	0,00	0,00
Equipamento de distribuição de asfalto - montado em caminhão	27	22	-	0,56	0,44	-	0,02	0,01	-
Aquecedor de fluido térmico	4	3	-	0,08	0,06	-	0,00	0,00	-
Usina de asfalto a quente - 90/120 t/h com filtro de manga	50	38	-	1,01	0,78	-	0,03	0,02	-
Vibroacabadora de asfalto - sobre esteiras	18	14	-	0,36	0,27	-	0,01	0,01	-

continua

continuação Tabela 22

Serviço	Emissões								
	CO ₂ (t)			N ₂ O (kg)			CH ₄ (kg)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Fresadora e distribuidora de solo - para regularizar subleito	-	4	3	-	0,08	0,06	-	0,00	0,00
Compressor de ar - 200 PCM	-	-	3	-	-	0,05	-	-	0,00
Conjunto de britagem - 80 m³/h	153	102	105	3,10	2,06	2,12	0,10	0,06	0,07
Espalhadora de concreto	-	-	7	-	-	0,14	-	-	0,00
Acabadora de concreto com forma deslizante	-	-	8	-	-	0,17	-	-	0,01
Texturizadora e lançadora	-	-	1	-	-	0,02	-	-	0,00
Serra de disco diamantado	-	-	0	-	-	0,01	-	-	0,00
Seladora de juntas	-	-	0	-	-	0,00	-	-	0,00
Central de concreto - 180m³/h - dosadora e misturadora	-	7	15	-	0,14	0,31	-	0,00	0,01
Caminhão basculante - 10 m³ - 15 t	114	93	32	2,32	1,89	0,65	0,07	0,06	0,02
Caminhão tanque - 10.000 L	33	20	14	0,66	0,41	0,28	0,02	0,01	0,01
Caminhão espargidor tanque 6.000 L	-	-	6	-	-	0,12	-	-	0,00
Grupo gerador - 36/40 KVA	9	7	-	0,17	0,13	-	0,01	0,00	-
Grupo gerador - 164 / 180 KVA	63	35	7	1,27	0,72	0,15	0,04	0,02	0,00
Grupo gerador - 288 KVA	128	96	111	2,59	1,94	2,24	0,08	0,06	0,07
Total	777	893	384	15,74	18,09	7,77	0,49	0,57	0,24

Conforme com os valores obtidos é possível verificar que o pavimento Tipo B é dentre os três o que mais contribui com emissões de CO₂, N₂O e CH₄. Isso provavelmente ocorre devido ao reforço de subleito em solo que apresenta em sua composição de serviços grande quantidade de horas de trator de esteiras com lâmina para a extração do material da jazida de empréstimo.

Cabe destacar que, para as três alternativas apresentadas, a britagem de materiais pétreos é responsável por grande parte das emissões de CO₂ equivalentes, seguida da produção e distribuição da mistura asfáltica.

3.4.3.3. *Módulo 3 – Distância de transporte*

O módulo 3 do inventário engloba desde o transporte do material de limpeza para locais de bota-fora, transporte dos materiais de terraplenagem quando pertinentes, transporte de todos os materiais para a construção das camadas do pavimento.

Para transporte serão utilizados caminhões com caçamba térmica, caminhão basculante e caminhão betoneira. O material de limpeza e também o excedente extraído do local será encaminhado para bota-fora de aterro inerte (Classe IIB) licenciado e localizado a 79,7 km de distância do local de implantação da obra.

Com relação ao material de empréstimo para terraplenagem será empregada jazida de empréstimo localizada a uma distância de 6,5 km do centro geométrico da obra. Já quanto ao material de empréstimo para reforço do subleito será utilizada localizada a uma distância de 7,8 km do centro geométrico da obra.

Para fornecimento de material pétreo britado (brita 1, 2 e 3) será usada a pedreira situada a 82 km de distância do centro geométrico da obra. Já para a usinagem da brita graduada simples e solo brita será empregada a usina de solos instalada junto ao canteiro de obras.

No caso da produção de concreto de cimento Portland, concreto compactado com rolo e brita graduada tratada com cimento será implantada central dosadora e misturadora de concreto – 180 m³/h junto ao canteiro de obras, portanto será considerada a distância de transporte de 5 km para esse material.

Por fim, para a produção da mistura asfáltica será implantada usina de asfalto a quente - 90/120 t/h com filtro de manga junto ao canteiro de obras, portanto, será levada em conta a distância de transporte de 5 km para esse material.

Dentro deste contexto, a Tabela 23 mostra as distâncias de transporte para cada serviço, baseando-se no trajeto de ida dos caminhões em situação carregada e o seu retorno vazio.

Tabela 23 - Distância média de transporte para os serviços considerados

Serviço	Local de origem/ Destino	Distância (km)
Transporte de material de limpeza	Bota-fora licenciado	79,7
Material de empréstimo para reforço	Jazida	7,8
Material britado	Pedreira	82,0
Fornecimento de cimento Portland	Empresa fabricante	88,9
Fornecimento de CAP	Distribuidor de asfalto	98,0
Material granular usinado	Canteiro	5,0
Material usinado com cimento Portland	Usina/Canteiro	5,0
Material asfáltico usinado	Usina/Canteiro	5,0

De acordo com as distâncias de transporte estimadas para o projeto, foram calculadas as horas necessárias de caminhões para todo o transporte de materiais para a execução da obra (Tabela 24).

Tabela 24 - Quantidades de horas de caminhões para transporte de materiais para bota-fora e construção da rodovia

Equipamentos	Quantidade de horas (h)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Caminhão com caçamba térmica	8.423	6.521	-
Caminhão basculante - 10 m ³ /15 t	47.511	54.607	47.084
Caminhão betoneira - 11,5 t/5m ³	-	-	3.696

A quantidade de energia primária consumida foi obtida por meio da equação 5, já exibida no módulo anterior. Na Tabela 25 estão apresentados os valores de energia necessárias ao transporte de materiais para a construção da rodovia.

Tabela 25 - Quantidade de energia primária consumida para serviços de transporte

Equipamento	Quantidade de Energia Primária (GJ)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Caminhão com caçamba térmica	4.124	3.192	-
Caminhão basculante - 10 m ³ /15 t	35.918	41.283	35.595
Caminhão betoneira - 11,5 t/5m ³	-	-	2.727
Total	40.042	44.475	38.323

Assim como nos módulos anteriores, também foram calculados valores de quantidades de emissões de GEE para os serviços de transporte, utilizando a metodologia simplificada do IPCC, tendo sido obtidos os resultados exibidos na Tabela 26.

Tabela 26 - Quantidades de emissões para transporte de materiais para bota-fora e construção da rodovia

Equipamento	Emissões								
	CO ₂ (t)			N ₂ O (kg)			CH ₄ (kg)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Caminhão com caçamba térmica	326	252	-	6,60	5,11	-	0,21	0,16	-
Caminhão basculante - 10 m ³ /15 t	2.838	3.261	2.812	57,47	66,05	56,95	1,80	2,06	1,78
Caminhão betoneira - 11,5 t/5 m ³	-	-	215	-	-	4,36	-	-	0,14
Total	3.163	3.514	3.027	64,07	71,16	61,32	2,00	2,22	1,92

De acordo com os valores obtidos pode-se verificar que o pavimento Tipo B é o que apresenta maiores valores de emissões de CO₂, N₂O e CH₄ (seguindo a tendência do Módulo 2), e isso provavelmente ocorreu devido à grande utilização de caminhões basculantes que, apesar de ser um equipamento muito empregado em várias fases da construção dos três pavimentos analisados, tem o seu uso em maior quantidade no pavimento Tipo B, por possuir uma espessura total de pavimento maior que as outras alternativas.

3.4.3.4. *Módulo 4 – Congestionamentos ou atrasos aos usuários*

Para o presente trabalho, devido os trabalhos serem executados em uma importante rodovia com tráfego avaliado como pesado, foi considerado que os trabalhos de conservação serão realizados em período noturno, sendo que, dessa forma, haverá pouca interferência no fluxo do tráfego da rodovia, restringindo o prejuízo social aos usuários. Adicionalmente, ponderou-se que apenas os trabalhos de restauração serão realizados durante o dia e, assim, haveria o fechamento de uma faixa de tráfego por vez. Isto faria com que a velocidade média dos veículos fosse reduzida de 100 km/h para 65 km/h, porém não seria levado em conta o aumento no consumo do combustível com a redução da velocidade por essa redução não ser inferior a 60 km/h.

Para os serviços de restauração diurna na rodovia é estimado que sejam gastos cerca de 12 horas para cada 1 km de faixa restaurada, resultando em 60 dias para cada ciclo de restauração, ou seja, para o pavimento Tipo A serão levados em conta 60 dias de fechamento de faixa nos anos 5, 10, 14, 17 e 20. Para o pavimento Tipo B, será considerado o fechamento de uma faixa de tráfego durante 60 dias nos anos 5, 10, 15 e 20.

Já para o pavimento Tipo C seriam 20 dias para a selagem de juntas e trincas (20% da área total) no 10º ano, 53 dias para recomposição de placas (2% da área total) e 90 dias para cepilhamento de toda a plataforma no 20º ano.

Resumidamente, na Tabela 27 é apresentado o período total para intervenção em cada alternativa.

Tabela 27 – Período total de intervenção para cada alternativa

Pavimento	Período (dias de intervenção)
Tipo A	300
Tipo B	216
Tipo C	163

Como a via em estudo trata-se de uma rodovia de classe I-A, não foi considerada a possibilidade de uso de desvios de rota. Dessa forma, o usuário não poderá optar em aumentar o trajeto de forma a evitar os congestionamentos. Portanto, para essa fase não foi levada em conta para a LCA acréscimo de emissões pelo consumo adicional de combustível.

3.4.3.5. *Módulo 5 – Operação e uso da rodovia*

Nesse módulo será abordado apenas o aumento do gasto de combustível pelo avanço da irregularidade da superfície de rolamento da rodovia, não sendo consideradas as emissões pelos veículos que utilizarão a rodovia.

Portanto, com a verificação do crescimento do IRI mediante a análise de desempenho dos pavimentos asfálticos, foi aplicado o fator FCF ano a ano, de modo a observar o aumento do consumo do combustível devido ao progressivo aumento da irregularidade da rodovia. Para isso, foram empregadas as equações (7) e (8), cuja metodologia também foi utilizada por Yu *et al.* (2013). Em seguida, na Tabela 28 e na Tabela 29 é apresentado o consumo adicional para cada pavimento analisado.

$$FCF_{LEVES} = 7,377 \times 10^{-3} IRI + 0,993 \quad (7)$$

$$FCF_{PESADOS} = 2,163 \times 10^{-2} IRI + 0,953 \quad (8)$$

Onde:

- FCF = fator de consumo de combustível (superior a 1,0).

Tabela 28 - Aumento do consumo de combustível em função do aumento do IRI para veículos leves

Ano	PAVIMENTO TIPO A			PAVIMENTO TIPO B			PAVIMENTO TIPO C		
	IRI	FCF LEVES	Aumento do consumo (%)	IRI	FCF LEVES	Aumento do consumo (%)	IRI	FCF LEVES	Aumento do consumo (%)
2	1,92	1,007	0,72	1,77	1,006	0,61	2,10	1,008	0,85%
3	2,00	1,008	0,78	1,77	1,006	0,61	2,16	1,009	0,90%
4	2,08	1,008	0,83	1,85	1,007	0,66	2,23	1,009	0,94%
5	2,00	1,008	0,78	1,85	1,007	0,66	2,29	1,010	0,99%
6	2,08	1,008	0,83	1,85	1,007	0,66	2,36	1,010	1,04%
7	2,08	1,008	0,83	1,92	1,007	0,72	2,43	1,011	1,10%
8	2,15	1,009	0,89	1,92	1,007	0,72	2,51	1,011	1,15%
9	2,15	1,009	0,89	2,00	1,008	0,78	2,58	1,012	1,21%
10	2,08	1,008	0,83	1,85	1,007	0,66	2,10	1,008	0,85%
11	2,15	1,009	0,89	1,92	1,007	0,72	2,16	1,009	0,90%
12	2,15	1,009	0,89	1,92	1,007	0,72	2,23	1,009	0,94%
13	2,23	1,009	0,95	2,00	1,008	0,78	2,29	1,010	0,99%
14	2,15	1,009	0,89	2,00	1,008	0,78	2,36	1,010	1,04%
15	2,15	1,009	0,89	1,92	1,007	0,72	2,10	1,008	0,85%
16	2,23	1,009	0,95	1,92	1,007	0,72	2,16	1,009	0,90%
17	2,15	1,009	0,89	2,00	1,008	0,78	2,23	1,009	0,94%
18	2,15	1,009	0,89	2,00	1,008	0,78	2,29	1,010	0,99%
19	2,23	1,009	0,95	2,08	1,008	0,83	2,36	1,010	1,04%
20	2,15	1,009	0,89	1,92	1,007	0,72	2,43	1,011	1,10%

Para o pavimento Tipo C o aumento da irregularidade da superfície foi estimado ano a ano a uma taxa de crescimento de 3% ao ano, que é também a taxa de crescimento do tráfego, dessa forma o valor de IRI inicia-se em 2 m/km até atingir no 20º ano o valor de 2,58 m/km.

Tabela 29 - Aumento do consumo de combustível mediante aumento do IRI
para veículos pesados

Ano	PAVIMENTO TIPO A			PAVIMENTO TIPO B			PAVIMENTO TIPO C		
	IRI	FCF PESADOS	Aumento do consumo (%)	IRI	FCF PESADOS	Aumento do consumo (%)	IRI	FCF PESADOS	Aumento do consumo (%)
2	1,92	0,995	0,00	1,77	0,991	0,00	2,10	0,998	0,00
3	2,00	0,996	0,00	1,77	0,991	0,00	2,16	1,000	0,00
4	2,08	0,998	0,00	1,85	0,993	0,00	2,23	1,001	0,12
5	2,00	0,996	0,00	1,85	0,993	0,00	2,29	1,003	0,26
6	2,08	0,998	0,00	1,85	0,993	0,00	2,36	1,004	0,41
7	2,08	0,998	0,00	1,92	0,995	0,00	2,43	1,006	0,57
8	2,15	1,000	0,00	1,92	0,995	0,00	2,51	1,007	0,72
9	2,15	1,000	0,00	2,00	0,996	0,00	2,58	1,009	0,89
10	2,08	0,998	0,00	1,85	0,993	0,00	2,10	0,998	0,00
11	2,15	1,000	0,00	1,92	0,995	0,00	2,16	1,00	0,00
12	2,15	1,000	0,00	1,92	0,995	0,00	2,23	1,001	0,12
13	2,23	1,001	0,13	2,00	0,996	0,00	2,29	1,003	0,26
14	2,15	1,000	0,00	2,00	0,996	0,00	2,36	1,004	0,41
15	2,15	1,000	0,00	1,92	0,995	0,00	2,10	0,998	0,00
16	2,23	1,001	0,13	1,92	0,995	0,00	2,16	1,000	0,00
17	2,15	1,000	0,00	2,00	0,996	0,00	2,23	1,001	0,12
18	2,15	1,000	0,00	2,00	0,996	0,00	2,29	1,003	0,26
19	2,23	1,001	0,13	2,08	0,998	0,00	2,36	1,004	0,41
20	2,15	1,000	0,00	1,92	0,995	0,00	2,43	1,006	0,57

O VDM para veículos leves para o primeiro ano de implantação da rodovia é 6.506 e para veículos pesados é 1.851. De acordo com MMA (2011), a idade média da frota dos veículos brasileiros é de 15 anos, e apesar do amplo uso do etanol, os combustíveis mais utilizados são gasolina e diesel, respectivamente para veículos leves e veículos pesados, e a temperatura média da região onde se encontra a rodovia em estudo é de 20°C a 35°C. Assim, com esses parâmetros apresentados é possível estimar o consumo de combustível da frota circulante num determinado ano-calendário por meio da equação (9).

$$Ci_{estimado} = Fr_i \times \frac{Iu_{i,referência}}{Ql_i} \quad (9)$$

Onde:

- $Ci_{estimado}$ = consumo anual de combustível do veículo tipo i (L/ano);
- Fr_i = frota em circulação no ano do veículo do tipo i (número de veículos);
- $Iu_{i,referência}$ = intensidade de uso de referência do veículo do tipo i, em quilometragem anual percorrida (km/ano), conforme MMA (2011);
- Ql_i = quilometragem por litro de combustível do veículo tipo i (km/L), conforme MMA (2011).

A partir da quantidade de combustível utilizada pela frota circulante na rodovia é possível verificar a quantidade de combustível excedente consumido pelo usuário, devido ao aumento da irregularidade da via (Tabela 30).

Tabela 30 - Estimativa do consumo de combustível excedente para 20 anos

Ano	Leves			Pesados		
	Iu (km/ano)	Qi (km/L)	C _{adicional} (L/20anos)	Iu (km/ano)	Qi (km/L)	C _{adicional} (L/20anos)
Tipo A	10.000	10	1.363.214	100.000	6	324.624
Tipo B	10.000	10	1.129.060	100.000	6	-
Tipo C	10.000	10	1.545.116	100.000	6	3.639.523

Onde: $C_{adicional} = Ci_{estimado} \times \text{Aumento do consumo (\%)}$

Aplicando-se a equação (8) para o pavimento Tipo B não foi verificado consumo adicional de combustível para veículos pesados devido ao aumento do IRI, e isso advém das intervenções que serão realizadas nos períodos previstos, interrompendo o avanço das irregularidades superficiais do pavimento.

Para o cálculo do volume de emissões gerados pela queima dos combustíveis será aplicada a equação (10):

$$E = Fr \times Iu \times Fe \quad (10)$$

Onde:

- E = taxa anual de emissão do poluente (g/ano);
- Fr = frota circulante de veículos do ano/modelo considerado (número de veículos);
- lu = intensidade de uso do veículo do ano/modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida (km/ano). Trata-se de uma variável que depende de um conjunto de fatores socioeconômicos que, neste inventário, são representados pela idade do veículo;
- Fe = fator de emissão do poluente, expresso em termos da massa de poluentes emitida por km percorrido ($g_{\text{poluente}}/\text{km}$). É específico para o ano/modelo de veículo e depende do tipo de combustível usado.

Com a aplicação da equação (10), e levando em conta os parâmetros já adotados, tem-se como taxa de emissão anual de CO₂ o equivalente a 2,269 g/L de gasolina no caso dos veículos leves e 2,671 g/L de diesel no caso dos veículos pesados.

Para a estimativa de emissões de N₂O e CH₄ são empregados os princípios do IPCC, que pondera que para cada 79 g de CO₂ emitidos são também produzidos 0,0016 g de N₂O e 0,00005 g de CH₄.

Na Tabela 31 são apresentados os valores obtidos na presente pesquisa, utilizando-se a equação (10).

Tabela 31 - Acréscimo de emissões devido ao aumento do consumo de combustível pelo aumento do IRI para o período de 20 anos

Pavimento	Emissões adicionais (kg)					
	CO ₂		S ₂ O		CH ₄	
	Leves	Pesados	Leves	Pesados	Leves	Pesados
Tipo A	3.093	867	0,060	0,018	0,002	0,001
Tipo B	2.562	-	0,050	0,000	0,002	0,000
Tipo C	3.506	9.721	0,068	0,197	0,002	0,006
Total	9.161	10.588	0,179	0,214	0,006	0,007

3.4.4. Análise de impacto do ciclo de vida (AICV)

Conforme já mencionado anteriormente, os indicadores ambientais neste estudo incluem o consumo de energia, potencial de aquecimento global, emissões de poluentes atmosféricos e da água.

3.4.4.1. Consumo de energia primária

Os consumos de energia primária para uma obra de 10 km de pavimento dos tipos A, B e C são 433, 388 e 167 TJ, respectivamente, conforme indicado no Gráfico 5. Cabe mencionar que não foi considerada a energia consumida pelo tráfego referente ao aumento do IRI da rodovia, pois o mesmo teve suas emissões calculadas por litro de combustível consumido.

Gráfico 5 - Energia primária consumida por cada tipo de pavimento (TJ)

Pelo Gráfico 5 que dentre os três aspectos analisados a produção das matérias primas é o maior consumidor de energia primária, sendo que em meio aos três

pavimentos objetos desta pesquisa, o Tipo A é o que apresenta maior valor (2,6 vezes maior que o Tipo C). Isso ocorre devido a maior quantidade de intervenções para esse tipo de pavimento durante o período de análise, seguido pelo pavimento Tipo B (que apresenta quantidade de energia consumida 2,33 vezes maior que o Tipo C).

Verifica-se que o consumo de energia primária na construção dos pavimentos não teve impacto importante nas três situações analisadas, em relação aos outros dois aspectos, ainda que tenha demonstrado ser mais significativo nos pavimentos Tipo A e B.

No caso das distâncias de transporte o pavimento Tipo B é o que apresenta o maior consumo já que é a alternativa que possui em sua composição a utilização de solo retirado de jazida de empréstimo para reforço do subleito.

Resumidamente em relação ao pavimento do Tipo A, que é aquele que consome a maior quantidade de energia primária, o pavimento Tipo B consumiu 10% menos e o Tipo C consumiu 62% menos.

Os resultados obtidos confirmam os obtidos por Silva *et al.* (2014), os quais obtiveram resultados de consumo de energia primária 61% menores para pavimento de concreto em comparação ao pavimento asfáltico.

3.4.4.2. *Potencial de aquecimento global*

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) inventariadas neste estudo incluem CO₂, N₂O e CH₄ e são apresentadas na Tabela 32 a seguir.

Tabela 32 - Quantidades totais de emissões de GEE

Módulo/Etapa	Emissões (t)								
	CO ₂			N ₂ O			CH ₄		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
1 Matérias-primas	1.981	3.708	13.751	1,50E-03	1,65E-03	1,08E-02	1,02E-02	8,68E-03	2,13E+00
2 Construção	777	893	384	1,57E-02	1,81E-02	7,77E-03	4,92E-04	5,65E-04	2,43E-04
3 Transporte	3.163	3.514	3.027	6,41E-02	7,12E-02	6,13E-02	2,00E-03	2,22E-03	1,92E-03
4 Congestionamentos/atrasos dos usuários									
5 Operações e uso	4	3	13	7,80E-05	5,00E-05	2,65E-04	2,44E-06	1,56E-06	8,29E-06
Total	4.465	5.926	8.118	0,08	0,09	0,08	0,01	0,01	2,14

O Gráfico 6 mostra o impacto do aquecimento global que é caracterizado por emissões de GEE, em toneladas métricas de CO₂ equivalente. Conforme mencionado anteriormente, o cálculo é realizado multiplicando-se a massa emitida de cada GEE pelo seu potencial de aquecimento global, onde o GWP é de 1 para o CO₂, 23 para o metano e 296 para o óxido nitroso.

Gráfico 6 – Impacto de aquecimento global em função das emissões de CO₂ equivalente

As emissões de CO₂ dominam significativamente a contribuição para o impacto do aquecimento global: nos três pavimentos analisados, tal contribuição do CO₂ foi de 99% no ciclo de vida do pavimento.

Verifica-se ainda que o pavimento Tipo A, apesar de ser o maior consumidor de energia primária entre as três estruturas objeto desta pesquisa, não é apontado como o maior responsável pelos efeitos do aquecimento global, sendo que produz 27% menos emissões de CO₂ equivalentes que o pavimento Tipo B e

66% menos que o pavimento Tipo C. Isso se deve à etapa de produção das matérias-primas para a construção dos pavimentos: os pavimentos Tipo B e C possuem cimento na sua composição e, por conta disto, observa-se o quanto a produção do cimento pode ser impactante ao meio ambiente mediante à grande quantidade de CO₂ equivalente atrelada a ele. Nessa fase a emissão de CO₂ no caso do pavimento Tipo A é 86% menor que do pavimento Tipo C, e 47% menor que do pavimento Tipo B.

Já na fase de construção da rodovia o pavimento Tipo C é o que menos libera CO₂ equivalente na atmosfera, e isso ocorre devido ao menor período de restaurações na rodovia ao longo dos 20 anos de análise, sendo neste caso 51% menor que o pavimento Tipo A e 57% menor que o pavimento Tipo B.

Para a fase de transporte de materiais, os valores não apresentam grandes diferenças, sendo que o pavimento Tipo B é o que indicou maiores valores de CO₂ equivalentes. O pavimento Tipo C é o que apresenta menores resultados, sendo que, em relação ao pavimento Tipo B, tem uma redução de 14%, e em relação ao pavimento Tipo A a diferença é de 4%. Caso fosse possível reduzir pela metade a distância de transporte de bota-fora e de jazidas de empréstimo, as emissões de CO₂ equivalentes seriam minimizadas em 36% a 41% nessa etapa de implantação da rodovia.

Na fase de operações e uso da rodovia, o pavimento Tipo C apresentou o maior valor de emissão em relação às outras duas alternativas. É provável que isso ocorra conforme a progressão do IRI ao longo do período de análise. Nos pavimentos com revestimento em concreto asfáltico, por conta dos vários períodos de intervenção, a progressão do IRI é adiada, causando um menor consumo adicional de combustível aos usuários pelas irregularidades na superfície do pavimento. Para o pavimento Tipo B, as emissões equivalentes referentes a essa fase são reduzidas em 35% em comparação com o pavimento Tipo A e 81% em relação ao pavimento Tipo C.

Os dados obtidos confirmam os resultados obtidos por Silva *et al.* (2014), os quais obtiveram resultados de emissões de CO₂ equivalentes 71% menores para pavimento asfáltico em relação ao pavimento de concreto.

3.4.4.3. Emissões de poluentes atmosféricos e da água

Também foram avaliadas as emissões de partículas na atmosfera e de poluentes da água, esta última por meio da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e da DQO (Demanda Química de Oxigênio), para a etapa de produção dos materiais (que é a fase mais significativa em todo o ciclo de vida). Os resultados encontram-se no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Emissões de partículas, DBO e DQO

De acordo com os resultados apresentados, é possível verificar uma expressiva quantidade de emissões de partículas na atmosfera no caso do pavimento Tipo C. Esse grande volume se deve à produção do cimento, por isso, o pavimento Tipo C tem a maior contribuição em emissões de partículas na atmosfera.

Por outro lado, o pavimento Tipo A apresentou quantidade de emissões de partículas 21% superior à do Tipo B, sendo este valor mais elevado devido à maior quantidade de britagem de material pétreo que compõe sua estrutura.

Já com relação à emissão de poluentes na água, o pavimento Tipo C também é o maior poluidor. Isso se deve à utilização de baguete limitador de polietileno que contribui com 93% da quantidade total de poluentes na água.

3.5. Análise de custo do ciclo de vida (LCCA)

Dando continuidade, os modelos a serem avaliados são os pavimentos Tipo A, B e C, para os quais anteriormente já foram realizadas as composições de quantidades de serviços de cada uma das três estruturas apresentadas. Portanto, na presente análise será avaliado o custo do ciclo de vida para cada uma delas.

3.5.1. Custos à administração rodoviária

Para o cálculo dos custos à administração rodoviária foi efetuada a aplicação direta das quantidades totais de serviços na planilha do SICRO 2 – São Paulo, obtendo-se, assim, o preço para cada serviço de construção. Os custos correspondem à extensão total da rodovia, e a data-base para os preços é de março/2016.

3.5.1.1. Custos iniciais de construção

Os custos totais de construção inicial para as estruturas de pavimento em análise encontram-se na Tabela 33.

Tabela 33 - Custos totais de construção inicial para as três alternativas de pavimento

Pavimento	Custo total de construção (R\$)
Tipo A	24.294.446
Tipo B	22.213.330
Tipo C	25.846.420

Conforme Tabela 33, verifica-se que o pavimento Tipo C, conforme esperado, é o que possui o mais alto custo de implantação frente às outras duas alternativas. Já o pavimento Tipo A apresenta valor de implantação superior ao pavimento Tipo B, provavelmente devido a uma camada mais espessa de capa asfáltica e também motivado pela utilização de camada de solo-brita como reforço do subleito, já que no pavimento Tipo B o reforço de subleito é em solo proveniente de jazida de empréstimo (menos oneroso).

3.5.1.2. Custos de conservação

Mediante a análise de desempenho dos pavimentos em estudo foram definidos os períodos de restauração para cada estrutura proposta e, com a utilização do SICRO 2, foram calculados os custos de conservação e restauração para cada pavimento proposto ano a ano. Os valores resultantes para cada tipo de pavimento encontram-se apresentados nas Tabela 34.

Tabela 34 - Custo total para conservação e restauração dos pavimentos analisados

Custos de conservação e restauração ano a ano (R\$)			
Ano	Tipo A	Tipo B	Tipo C
1	Ano de abertura		
2	9.536	9.536	1.134
3	18.276	18.276	2.267
4	27.015	27.015	3.401
5	1.901.164	1.901.164	4.534
6	46.088	46.088	5.668
7	92.176	92.176	5.668
8	138.264	138.264	5.668
9	184.352	184.352	5.668
10	2.095.052	2.095.052	45.343
11	230.440	230.440	5.668
12	230.440	230.440	5.668
13	230.440	230.440	5.668
14	2.095.052	230.440	5.668
15	230.440	2.095.052	332.305
16	230.440	230.440	5.668
17	2.095.052	230.440	5.668
18	230.440	230.440	5.668
19	230.440	230.440	5.668
20	2.095.052	2.095.052	2.041.295
Total	12.410.158	10.545.546	2.498.292

De acordo com os valores apresentados na Tabela 34, o pavimento Tipo A é o que apresenta maior custo de conservação periódica e restauração em relação aos pavimentos Tipo B e C. O pavimento Tipo C, devido à menor necessidade de intervenções, é o que leva a menores custos nessa fase.

3.5.2. Custos aos usuários

3.5.2.1. Estimativa do custo do tempo do usuário

Para o estudo da estimativa do custo do tempo dos usuários foi utilizada a metodologia do Manual de Avaliação de Projetos de Transportes Urbanos do IPEA e ANTP (1997) para o projeto BIRD IV.

Frente a outras metodologias de cálculo pesquisadas, a equação (11) do IPEA foi considerada a mais adequada, é a que melhor se aplica, por ser um estudo específico para o Brasil. Para o uso do modelo, adotou-se como parâmetro a renda média da cidade onde será implantada a rodovia.

$$CT = \frac{RSM \times ES \times FA \times HP}{NH} \quad (11)$$

Onde:

- CT = valor da hora (R\$/hora);
- RSM = renda média dos habitantes da cidade (R\$);
- ES = encargos sociais 95,02% = 1,9502;
- FA = 0,3 (possibilidade de uso alternativo em quantidade útil de tempo);
- HP = percentual de uso produtivo do tempo (% viagens a trabalho + % viagens casa - trabalho * 0,75). Caso não disponível, usado 0,5;
- NH = número de horas de trabalho por mês = 168 horas.

Segundo o IBGE⁸, a renda *per capita* em Reais para o Estado de São Paulo é de R\$ 1.432,00, o que resulta em um custo por hora de atraso em congestionamentos de R\$ 2,49.

Conforme já mencionado anteriormente, o limite de velocidade nos trechos que sofrerão influência das obras de restauração será reduzido de 100 km/h para uma velocidade de zona de trabalho de 65 km/h. Deste modo, para um veículo leve com nível de utilização (IU) de 10.000 km/ano, tem-se uma média mensal

⁸«Renda média domiciliar per capita segundo Unidade da Federação - 2014». IBGE. Acesso em 2 de março de 2015.

diária de uso de 27,4 km/dia. Com a redução da velocidade de 100 km/h para 65 km/h, o usuário gasta 54% de tempo adicional, resultando em 0,15 h/de atraso por dia devido às obras de restauração da rodovia. Multiplicando-se o tempo adicional pelo período estimado de execução dos trabalhos, é obtido o tempo total que o usuário terá gasto em suas viagens de forma suplementar ao longo dos 20 anos analisados.

Nesta etapa foi realizado o cálculo do volume diário médio total para os 20 anos de análise. Os resultados da progressão do VDM, podem ser verificados na Tabela 35 a seguir.

Tabela 35 - Progressão do VDM ano a ano

Ano	VDM pesados	VDM leves
1	1.851	6.506
2	2.045	6.674
3	2.259	6.846
4	2.496	7.023
5	2.758	7.204
6	3.047	7.389
7	3.185	7.568
8	3.330	7.751
9	3.482	7.939
10	3.640	8.132
11	3.806	8.328
12	4.002	8.470
13	4.209	8.615
14	4.426	8.762
15	4.655	8.912
16	4.895	9.064
17	5.032	9.219
18	5.173	9.378
19	5.317	9.538
20	5.466	9.805
VDM total para 20 anos	3.754	8.156

Na Tabela 36 e na Tabela 37 estão apresentados todos os custos estimados para os usuários referentes ao tempo gasto em atrasos devido às obras de manutenção na rodovia.

Tabela 36 - Estimativa de custo do tempo para os usuários – Veículos leves

Pavimento	Período de restauração (dias)	Atrasos (h/dia)	Atrasos (h/20anos)	VDM total	Tempo gasto Valor total (R\$)
Tipo A	300	0,15	44	8.156	225.017
Tipo B	216		32		162.012
Tipo C	163		24		122.259

Tabela 37 - Estimativa de custo do tempo para os usuários – Veículos pesados

Pavimento	Período de restauração (dias)	Atrasos (h/dia)	Atrasos (h/20anos)	VDM total	Tempo gasto Valor total (R\$)
Tipo A	300	1,48	443	3.754	1.035.595
Tipo B	216		319		745.629
Tipo C	163		240		562.673

Verificando os resultados obtidos, pode-se observar que o pavimento Tipo A é o que causa o maior custo em tempo de atraso aos usuários o que se deve aos maiores períodos de restauração da rodovia.

3.5.2.2. *Consumo adicional de combustível devido ao aumento da irregularidade longitudinal*

Considerando as equações de desempenho aplicadas aos pavimentos Tipo A e B (que resultaram no Gráfico 1 e no Gráfico 2), tem-se os valores de progressão do IRI, com o qual é possível estimar a quantidade de combustível adicional consumido pelos usuários, devido ao aumento da irregularidade da rodovia (Tabela 2838 e Tabela 29).

Já para o pavimento Tipo C, admitiu-se a possibilidade de progressão do IRI em 3% a cada ano, atingindo o valor de 2,43 ao final do 20º ano de análise, no qual é proposta a solução de cepilhamento da superfície.

Para os pavimentos Tipo A e B pode-se verificar que o valor do IRI aumenta ano a ano, mas, após cada período de restauração, o valor do IRI regride, iniciando assim um novo ciclo. Já para o pavimento Tipo C o IRI progride até o 10º ano, quando nesse período recebe uma restauração, que faz com que o valor do IRI diminua, iniciando-se assim uma novo ciclo até o 20º ano.

O acréscimo no gasto de combustível para o pavimento Tipo A é de 1.687.838 de litros, para o pavimento Tipo B é de 1.129.060 litros e para o pavimento Tipo C chega a 5.184.639 litros.

Para atribuir preço aos combustíveis, foi verificado o valor médio de fornecimento de óleo diesel e gasolina no Estado de São Paulo conforme ANP⁹, a data base é de 30/05/2016 e os valores considerados são de R\$ 3,01/L e R\$ 3,73/L, respectivamente. Para o cálculo do consumo suplementar foi considerado que esse aumento resulta nos custos indicados na Tabela 38.

Tabela 38 - Custo do aumento do consumo de combustível por evolução do IRI

Pavimento	Aumento do consumo de combustível para os veículos (R\$)		Valor total (R\$)
	Leves	Pesados	
Tipo A	4.973.218	935.479	5.908.697
Tipo B	4.119.177	-	4.119.177
Tipo C	4.539.256	10.451.239	16.086.589

Conforme dados obtidos, o maior custo devido ao consumo adicional de combustível devido à evolução do IRI é atribuído ao pavimento Tipo C, o que se deve ao aumento mais acentuado do IRI nessa alternativa.

⁹http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp

3.5.2.3. Custo devido ao risco de acidentes

No cálculo do custo referente ao risco de acidentes, o MDOT (2003) propõe um custo suplementar de U\$0,13¹⁰/VMT¹¹ para viagens em zonas de construção e U\$0,09/VMT adicionais para contribuir com o aumento dos custos de tráfego acidentes. O resultado obtido é dado em R\$/km.

$$CA = \frac{P \times D \times VDM_{\text{médio/ faixa}} \times C_{VZC} + C_{\text{risco}}}{VMT} \quad (12)$$

Onde:

- CA = Custo do risco de acidentes (R\$);
- P = Período em dias;
- D = Distâncias percorridas por dia (km);
- VDM_{faixa} = VDM da rodovia para uma faixa de tráfego;
- C_{VZC} = Custo adicional aos usuários mediante à viagem em zonas de construção (R\$);
- C_{risco} = Custo adicional aos usuários devido ao risco em zonas de construção (R\$);
- VMT = quilômetros percorridos por veículo em viagem x 1,609 (km).

Utilizando-se a equação (12) para a estimativa de custo por causa do risco de acidentes, tem-se os resultados apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Custo devido ao risco de acidentes

Pavimento	Distâncias percorridas por dia (km)		VDM _{faixa}		Valor total (R\$)
	Leves	Pesados	Leves	Pesados	
Tipo A					22.626.548
Tipo B	27	274	1.020	469	16.291.115
Tipo C					12.293.758

¹⁰ Cotação do dólar comercial em <http://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/>. Acesso em 5 de junho de 2016.

¹¹ Milhas por Veículo em Viagem – 1 VMT = 1,609 km

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que os maiores períodos de tráfego em zonas de serviço majoram os riscos de acidentes e, por isso, o pavimento Tipo A apresenta valores maiores que o pavimento Tipo B (39% a mais) e que o Tipo C (84% a mais).

De um modo geral, todos os custos relacionados aos usuários da rodovia podem ser resumidamente apresentados conforme Tabela 40 a seguir.

Tabela 40 – Custo total relacionado aos usuários da rodovia

Pavimento	Custo total aos usuários da rodovia (R\$)
Tipo A	28.996.531,59
Tipo B	20.724.901,55
Tipo C	29.158.859,66

Estima-se, portanto, que os usuários da rodovia pavimentada com o Tipo A e o Tipo C ao longo de 20 anos tenham um custo adicional de cerca de 29% em relação ao pavimento Tipo B. Isso se deve ao fato do Tipo A apresentar um maior período de restauração da rodovia, levando a um maior tempo de fechamento de faixas de tráfego. Isto ocasiona um maior custo referente aos atrasos para os usuários, assim como também um grande período de tráfego em zonas de trabalho, o que implica em alto custo por risco de acidentes. No caso do pavimento Tipo C, por conta da proposição de restauração das faixas de rolamento somente no 10º, 15º e 20º ano, permite-se que haja elevação do IRI, trazendo alto custo aos usuários pelo consumo adicional de combustível.

3.5.3. Cálculo do valor presente líquido

Com o auxílio do método de cálculo do valor presente líquido (VPL) foi determinado o custo atual do ciclo de vida para os três pavimentos propostos. Foi utilizada uma taxa de atualização de 10% e o fator de valor atual usado foi 0,15. Na Tabela 41 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 41 - Valor presente líquido para cada alternativa proposta

Pavimento	SV - Valor Residual (R\$)	VPL (R\$)
Tipo A	314.258	36.403.490
Tipo B	523.763	31.543.260
Tipo C	510.324	35.776.913

Com os resultados obtidos através do cálculo do VPL pode-se observar que o pavimento Tipo B apresenta o menor valor dentre as três alternativas estudadas, além de proporcionar um maior valor residual após o período de 20 anos.

3.5.4. Análise comparativa dos resultados

De um modo geral, constata-se que o pavimento Tipo A é o que apresenta um maior custo do ciclo de vida, seguido pelo Tipo C (custo 10% menor que o Tipo A) e, por fim, o Tipo B (custo 19% inferior ao Tipo A). As informações citadas podem ser verificadas no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Custo total do ciclo de vida para as três alternativas estudadas

De acordo com os valores obtidos verifica-se que o pavimento Tipo B é o que apresenta o menor custo de implantação inicial. Comparativamente com o Tipo A, isso provavelmente ocorre pelo fato daquele ser constituído de menor camada de revestimento asfáltico, considerando que o CAP pode encarecer notavelmente uma obra. Já o custo de implantação do pavimento Tipo B é 9% menor que o pavimento Tipo A e 14% menor que o pavimento Tipo C.

Já em relação à restauração e conservação, o pavimento Tipo C é o que apresenta menores valores, sendo cerca de 68% menos que a alternativa Tipo B e 73% menos que a alternativa Tipo A. Isto porque este é o que apresenta menor necessidade de intervenções, frente às outras duas alternativas estudadas. O pavimento Tipo A é dentre os três o que apresenta mais ciclos de intervenções ao longo do período de análise.

O custo aos usuários é, dentre todos os parâmetros avaliados, o que mais se destaca pelo seu alto valor financeiro, que advém do parâmetro “custo devido ao

risco de acidentes” (em meio aos três aspectos atribuídos ao custo aos usuários, esse é o mais representativo, correspondendo a 65% do valor desse item).

Os custos do risco de acidentes devem ser levados em conta ao se decidir por uma alternativa de pavimento, visto que os valores imputados geralmente excedem significativamente os custos à agência rodoviária. Isso também pode ser verificado nos trabalhos de Zhang *et al.* (2008) e Wilde *et al.* (2001). Por esse motivo, é importante minimizar a interrupção das faixas de tráfego durante a restauração e conservação da rodovia.

Quanto ao valor residual, este representa o valor depreciado da rodovia ao final do período de 20 anos. Nesse aspecto o pavimento Tipo B é o que apresentou menor depreciação (maior valor residual), sendo 70% maior que o pavimento Tipo A e 3% maior que o pavimento Tipo C. Isso se deve ao fato de que após o período de análise, todos os pavimentos seguirão a um novo ciclo e o Tipo B tem prevista a próxima restauração no 25º ano, assim como o Tipo C. Porém, o investimento para a restauração do pavimento Tipo B no 20º ano é maior que no caso do Tipo C, ocasionando um valor residual maior. Já para o pavimento Tipo A, a previsão de restauração é para o 23º ano, ou seja, esse pavimento apresenta intervalos futuros menores para sua restauração.

Uma forma de indicar a alternativa mais vantajosa economicamente seria observar a que apresenta o menor VPL, como no Gráfico 9 (nesta análise foi tomada uma taxa de desconto de 10% para as três alternativas de pavimento).

Gráfico 9 – Valor presente líquido para as três alternativas analisadas

3.6. Integração LCA-LCCA

Conforme visto anteriormente no Gráfico 6, os resultados deste estudo mostram que o pavimento Tipo A apresenta a menor quantidade de emissões de CO₂ equivalentes, em comparação aos Tipos B e C.

Os parâmetros de produção da matéria-prima e transporte foram identificados como os maiores contribuintes para impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de cada uma das alternativas. Logo do ponto de vista econômico, em termos de VPL, a alternativa Tipo B é a que conduz ao menor impacto financeiro em meio às duas alternativas estudadas conforme pode ser verificado no Gráfico 10, sendo que os parâmetros construção inicial e custos dos usuários são os que apresentam os impactos mais significativos.

Gráfico 10 – Aspecto econômico x Aspecto ambiental

3.7. Aplicação do método multicritério AHP

Conforme os valores obtidos para cada aspecto analisado, foram então selecionados os resultados conforme a sua intensidade de importância para compor uma matriz de prioridades ao qual foram calculados pela metodologia AHP pesos para cada aspecto avaliado, os quais foram:

- *Valor presente líquido*
Esse parâmetro será considerado no nosso conjunto de prioridades como o principal, por ser o indicador mais significativo da viabilidade do investimento;
- *Emissões de CO₂ equivalentes ou potencial de aquecimento global (GEE)*
Esse aspecto impacta diretamente sobre a degradação do meio ambiente e da qualidade de vida das pessoas e será considerado como a segunda maior prioridade;
- *Construção inicial da rodovia*
Esses custos irão viabilizar ou inviabilizar o investimento na implantação da rodovia, por isso será tido como prioridade de número três;

- *Custo aos usuários*

Esse aspecto (conforme verificado anteriormente) tem um valor expressivo em relação aos demais parâmetros analisados e em alguns casos se mostrou até maior que o custo para a implantação da rodovia. Deste modo, para essa análise será considerado como prioridade de número quatro por afetar diretamente a vida cotidiana dos usuários da rodovia.

Cabe mencionar que a ordem prioritária supracitada tem como base os argumentos descritos, não sendo esses uma regra, podendo tais prioridades serem ajustadas em cada caso, de forma particular.

A partir da organização da ordem de prioridades, foi criada uma matriz para ser empregada no método AHP, cujos valores são atribuídos para cálculo dos pesos de cada aspecto (Tabela 42), sendo atribuído o valor 9 à maior prioridade e 1 à menor prioridade.

Tabela 42 - Matriz de prioridades

VPL	GEE	Construção inicial	Custos aos usuários	
9	5	3	1	Custos aos usuários
5	3	1	1/3	Construção inicial
3	1	1/3	1/5	GEE
1	1/3	1/5	1/9	VPL

As posições da diagonal serão sempre 1 (sendo cada elemento igualmente importante a ele mesmo). Na primeira linha foi inserido o valor de prioridade para cada elemento e esse valor se repete na primeira coluna à esquerda. Neste caso, o elemento VPL é nove vezes mais dominante que o custo aos usuários.

Logo, na última coluna à direita foi inserido o valor inverso em relação à ordem das prioridades, interpretando-se, por exemplo, que o custo aos usuários é nove vezes menos dominante que o VPL, e esses valores se repetem na ordem inversa na última linha da matriz. Conforme matriz elaborada, foi atribuído o valor

9 para o VPL (prioridade 1), 5 para potencial de aquecimento global (prioridade 2), 3 para custos de construção inicial (prioridade 3) e 1 para custos aos usuários (prioridade 4). Com isto, foram determinados os seguintes valores de pesos para cada aspecto analisado, conforme indicado na Tabela 43. Em seguida, aplicando os pesos aos resultados dos aspectos considerados foram obtidos os resultados apontados no Gráfico 11.

Tabela 43 – Aspectos e pesos calculados

Aspectos	Pesos
VPL (R\$)	0,57640
GEE (t)	0,25562
Construção inicial (R\$)	0,11724
Custo aos usuários (R\$)	0,05074

Gráfico 11 – Análise das prioridades

De acordo com os valores de prioridades sugeridos, pode-se verificar as vantagens para cada tipo de pavimento nos quatro aspectos avaliados. Assim,

se forem verificados os pavimentos sob o aspecto econômico, visando o melhor custo-benefício (sugerido como prioritário), o pavimento Tipo B é o que melhor atende às expectativas, por apresentar o menor valor de VPL ao longo do período de análise.

Em relação as emissões de CO₂ equivalentes, a opção mais vantajosa é o pavimento Tipo A, sendo que o Tipo C é, dentre as três alternativas, a seleção significativamente menos atrativa.

Já mediante o aspecto de custo de construção inicial o pavimento Tipo B é o que apresenta menor valor entre as três opções, enquanto os Tipos A e C se mostraram um pouco mais elevados e próximos entre si.

Em relação aos custos aos usuários, o pavimento Tipo B também é o que apresentou menor impacto, com os Tipos A e C sendo mais elevados e de valor semelhante.

De forma simplificada pode-se verificar que entre os quatro aspectos avaliados o pavimento Tipo B apresentou mais vantagens entre as três soluções avaliadas, ressaltando-se o menor valor de VPL que foi adotado como o aspecto de maior prioridade. Portanto, conforme a matriz de prioridades indicada e os parâmetros adotados, o pavimento Tipo B foi tido como a opção que atenderia melhor as necessidades propostas, dentre as três opções analisadas.

Na Tabela 44 pode-se comparar, de forma prática, a viabilidade de utilização de cada tipo de pavimento estudado, quer seja sob o âmbito ambiental ou financeiro, levando-se em conta os aspectos considerados na presente pesquisa.

Tabela 44 – Tabela comparativa de resultados

Análise	Aspectos		Pavimentos		
			Tipo A	Tipo B	Tipo C
LCA	Energia primária (consumo)		Maior	Intermediário	Menor
	Gases de efeito estufa (emissões)	CO ₂	Menor	Intermediário	Maior
		N ₂ O	Menor	Maior	Intermediário
		CH ₄	Menor	Intermediário	Maior
	Material particulado e poluentes da água (emissões)	Partículas	Intermediário	Menor	Maior
		DBO	Intermediário	Menor	Maior
		DQO	Maior	Intermediário	Menor
LCCA	Administração rodoviária (custos)	Custos iniciais de construção	Intermediário	Menor	Maior
		Custos de conservação	Maior	Intermediário	Menor
	Usuários (custos)	Custo do tempo	Maior	Intermediário	Menor
		Custo devido ao aumento do IRI	Intermediário	Menor	Maior
		Custo do risco de acidentes	Maior	Intermediário	Menor
	Valor presente líquido (custos)		Maior	Menor	Intermediário

4. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Com base nos resultados da pesquisa desenvolvida, verifica-se a importância de se realizar um projeto de infraestrutura rodoviária onde as integrações dos aspectos ambientais e econômicos também sejam trazidas em consideração no momento da decisão entre diferentes soluções de pavimentação. Isto porque os materiais e processos de cada alternativa irão abranger várias condicionantes que influenciarão no ciclo de vida dos mesmos. Deve-se, então, levar em conta todos os aspectos que implicam desde a produção dos materiais envolvidos até a finalização do processo de construção, além de manutenção, conservação e utilização da rodovia. Dentro deste contexto, a integração das ferramentas LCA e LCCA pode ser útil na realização deste tipo de análise, não tendo sido ainda explorada no Brasil.

A partir de três estruturas de pavimento propostas, foi possível observar o tipo e a quantidade de impacto que cada material ou serviço afeta o ambiente, sendo possível, dessa forma, verificar a sustentabilidade de cada alternativa.

A extração e produção das matérias-primas se mostram como grandes responsáveis pela liberação de CO₂ equivalente na construção de uma rodovia, sendo que a produção do cimento é especialmente a que mais afeta o meio ambiente neste aspecto, bem como é responsável por grandes quantidades de partículas sólidas suspensas na atmosfera nas regiões próximas às indústrias cimenteiras. Deste modo, a melhoria dos processos de produção de agregados e do próprio cimento se mostra como um passo importante para minimizar os aspectos relativos aos impactos ambientais, o que, por consequência, também seria positivo em termos de LCA e LCCA.

Na fase de construção da rodovia, a britagem de materiais pétreos é responsável por grande parte das emissões de CO₂ equivalentes, seguida pela produção e distribuição da mistura asfáltica. Neste último aspecto, o uso de misturas asfálticas mornas, por exemplo, pode ser uma alternativa interessante à mistura a quente convencional, uma vez que estas diminuem as emissões de poluentes atmosféricos, o que seria benéfico em uma LCA e LCCA.

A distância de transporte também influencia de forma muito incisiva quanto ao aspecto ambiental (além do aspecto econômico), por isso, menores distâncias de transporte ocasionariam menores quantidades de emissões de poluentes.

Os serviços de conservação rotineira e restauração da rodovia também contribuem significativamente no custo do ciclo de vida da rodovia, principalmente os pavimentos asfálticos que requerem mais períodos de manutenção. A utilização de misturas asfálticas com novas tecnologias como polímero e asfalto com adição de borracha são alternativas interessantes para o aumento da vida útil do pavimento asfáltico. O pavimento de concreto é o que apresenta o menor custo neste item, pois necessita de menos intervenções ao longo do período de análise.

Não foi considerado aumento do consumo de combustível mediante à redução da velocidade do tráfego durante os serviços de manutenção, por conta de congestionamentos ou atrasos de viagens, por isso não se tem neste trabalho os impactos relacionados à poluição do ar neste caso. Porém, há impactos relacionados à rotina dos usuários, atrasos de viagem, consumo adicional por meio da irregularidade longitudinal da superfície do pavimento e custo do risco de acidentes devido ao tráfego em zonas de trabalho.

Quanto à variação da quantidade de emissões pertinentes ao aumento da irregularidade longitudinal, esta não demonstrou alterações significativas comparando-se as quantidades de emissões totais. Porém, o aumento da irregularidade longitudinal gera grandes impactos econômicos aos usuários.

Já para a estimativa do custo do risco de acidentes durante o período de obras, não foram levados em conta valores de emissões para essa fase, porém foram computados custos estimados por intermédio do tráfego em zonas de trabalho durante os períodos de restauração da rodovia. Chegou-se à conclusão de que esses custos devem ser imputados ao custo do ciclo de vida da rodovia, pois são valores significativos e impactam diretamente a vida dos usuários, sendo que, para algumas alternativas, esse capital pode ser maior do que o custo de implantação da rodovia.

De maneira geral, pode-se verificar que a integração das ferramentas LCA e LCCA em serviços de pavimentação permitiram medir e comparar de forma analítica os indicadores de sustentabilidade e viabilidade econômica, desde a construção inicial do pavimento até a conservação e restauração da rodovia ao longo de 20 anos de análise, levando em consideração os impactos causados aos usuários da rodovia.

A avaliação AHP é uma forma de agregar as duas análises já que os aspectos ambientais e econômicos são de difícil comparação. Dentro deste contexto, a atribuição de pesos aos diversos aspectos analisados auxilia na tomada de decisão quanto ao tipo de estrutura de pavimento a ser adotado na obra, cuja solução leva em conta não somente a questão custo-benefício, mas também aspectos de sustentabilidade.

A aplicação do método apresentado permite avaliar de forma comparativa os resultados obtidos e confrontar os aspectos considerados mais relevantes no momento da implantação da rodovia, seja no que se refere ao aspecto ambiental, financeiro ou uma combinação dos dois, proporcionando adotar uma solução mais sustentável.

Além dos aspectos avaliados nesse trabalho, vale também considerar que, ao final da vida de cada pavimento analisado, inicia-se a fase de reciclagem ou demolição da estrutura. Em artigo publicado por Balbo e Dornelas (2015), a produção do agregado oriundo da demolição de um pavimento de concreto existente apresenta um acréscimo de 50% no custo final do agregado reciclado em relação ao agregado virgem, resultando em aumento de cerca de 20% nos custos de produção de concretos para pavimentação. Em contrapartida, Silva (2012), de um modo geral, fez um comparativo entre a utilização de material fresado como agregado em pavimentos asfálticos e agregados virgens, e constatou uma economia de 20,3% na construção de uma estrutura de pavimento.

Logo, é importante avaliar, não somente os resultados obtidos para o período de análise de um pavimento, mas também vislumbrar o processo futuro de reciclagem das estruturas propostas sob os aspectos ambientais e econômicos.

A avaliação da reciclagem das alternativas analisadas é, portanto, um assunto importante a ser considerado para pesquisas futuras.

Futuramente também seria importante a necessidade de pesquisas para atualizar as equações e dados utilizados na pesquisa, para aprimorar os resultados obtidos. É importante ressaltar que os resultados obtidos se aplicam somente às condições consideradas no estudo. Eventuais variações podem acarretar em alterações substanciais dos resultados finais.

De forma sintética, pode-se dizer que a pesquisa contribui na verificação dos aspectos proeminentes para a implantação de uma rodovia aos quais irão influenciar de forma direta e indireta na vida cotidiana das pessoas, seja por intermédio da poluição do meio, custos diretos aos usuários ou custos da administração rodoviária que, de alguma maneira, irão incidir sobre os usuários da rodovia, sob a forma de pedágios ou impostos.

A metodologia aplicada para a integração das ferramentas LCA-LCCA descrita nesse trabalho não visa apontar qual a melhor ou pior estrutura de pavimento a ser adotada, mas permite estimar de forma dinâmica e simplificada os custos e também volume de emissões e outros impactos durante o ciclo de vida de uma rodovia.

5. RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho não esgota o assunto em questão, muito pelo contrário, durante a pesquisa realizada, devido à grande quantidade de informações colhidas, muitos assuntos relacionados vieram à tona. Por isso, seguem registrados alguns temas propostos para trabalhos futuros que visem contribuir para as melhores técnicas de avaliação e para a continuidade do presente trabalho.

- Viabilidade econômica e ambiental em se projetar pavimentos asfálticos para um período de vida útil mínimo de 20 anos;
- Avaliação do ciclo de vida e avaliação do custo do ciclo de vida para a reciclagem de pavimentos asfálticos e pavimentos de concreto;
- Avaliação do ciclo de vida e custo do ciclo de vida para diferentes materiais de pavimentação, inclusive a utilização de materiais reciclados e misturas asfálticas mornas, ou ainda outras alternativas recém estudadas como a estabilização de solo com polímero acrílico biodegradável e utilização de cimento ecológico;
- Integração das técnicas LCA e LCCA utilizando outras metodologias de análise multicritério.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for design of pavement structures**. Washington, 1993.

ADLER, H. A. **Avaliação econômica dos projetos de transportes – Metodologia e exemplos**. Rio de Janeiro: Editora livros técnicos e científicos editora S.A, 1978.

AMOS, D. **Pavement smoothness and fuel efficiency: An analysis of the economic dimensions of the Missouri smooth road initiative**. Missouri: MDOT, December, 2006.

ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICO. **Transporte humano: cidades com qualidade**. São Paulo: ANTP, 1997.

ANWAR, A. M.; TAIB, S.; SALAH, W.A. **Malaysian energy demand and emissions from the transportation sector**. Article in Transport. January 2010.

ARCHONODO-CALLAO, R. S. **Roads economic decision model (RED) for economic evaluation of low volume roads**. Africa Transport - A technical note. Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP4). Abril, 1999.

ARTESP – AGÊNCIA REGULADORA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Serviços correspondentes as funções de conservação. Anexo 06 – Projeto Tamoios. São Paulo. Maio, 2014.

BAHIA, H. U.; MILLER, T. D. **Energy, emissions and recycling: opportunities for sustainable asphalt roads**. University of Wisconsin-Madison, WI, 5706, USA, 2012.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, J. T.; DORNELAS, R. C. **Custos de reciclagem de pavimentos de concreto e seu potencial econômico na realidade brasileira**. Transportes v. 23, n. 2, p. 75-84, 2015. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BANDEIRA, C.; FLORIANO, E. P. **Avaliação de impacto ambiental de rodovias**. Santa Rosa, Rio Grande do Sul, 2004.

BERLINER, C. **Gerenciamento de custos em indústrias avançadas: base conceitual CAM-I**. São Paulo: T. A. Queiroz. Fundação Salim Farah Maluf, 1992.

BEUREN, I. M.; SCHAEFFER, V. **Análise dos custos do ciclo de vida do produto: uma abordagem teórica**. 1997. Disponível em <<http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP>>. Acesso em 05 de fevereiro de 2017.

BIROLI, F. C. **Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos**. 2003. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BUTT, A. A. **Life cycle assessment of asphalt pavements including the feedstock energy and asphalt additives**. Thesis. Stockholm, October 2012.

CALTRANS - STATE OF CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Institute of Transportation Studies, UC Berkeley and UC Davis. **Pavement life cycle assessment workshop**. California. 2010.

CALTRANS - STATE OF CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - Division of maintenance pavement program. **Life cycle cost analysis procedures manuais**. 2013.

CARVALHO, M. D.; GROSSI, L. C.; IGNATI, M. B. **Custos comparativos de pavimentos rígidos e flexíveis em áreas críticas de solicitação de tráfego**. Reunião Anual de Pavimentação, 28, 1994, Belo Horizonte. Anais... Rio de Janeiro: RAPv, 1994.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira; engenharia econômica; tomada de decisão; estratégia empresarial**. 9.ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CDOT - DEPARTMENT OF TRANSPORTATION COLORADO. **Life cycle cost analysis and discount rate on pavements for the Colorado Department of Transportation**. Colorado, Outubro, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES/SEST/SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília, 2015.

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos**. Editora Campus, 2001.

COSTA, H. B. C. B. M. **Análise de custos de ciclo de vida relativa a pavimentos rodoviários flexíveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2008.

CSI - CAMBRIDGE SYSTEMATICS, INC., **Transportation asset management guide. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 20-24(11)**, 2002.

DER-SP - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Instrução complementar do departamento de estradas de rodagem do Estado de São Paulo** - Diretrizes e procedimentos para serviços de conservação especial incluindo a identificação de defeitos e definições de soluções para restauração de pavimentos rodoviários e da sinalização horizontal – IC-RP-000/002. São Paulo, SP, 2003.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – Normas rodoviárias vol. 1. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento B, **DNER PRO-011/79**. 1979.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - Norma administrativa. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento, **DNER PRO-159/85**. 1985.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - Norma administrativa. Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento (Sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter). Procedimento, **DNER PRO-164/94**. 1994.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de custos rodoviários. Metodologia e conceitos.** v1. 3. ed. - Rio de Janeiro, 2003.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de conservação rodoviária.** Publicação IPR-710. Brasília, 2005a.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentos rígidos.** Publicação IPR-714. Brasília, 2005b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** Publicação IPR-719. Brasília, 2006a.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** Publicação IPR-720. Brasília, 2006b.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **SICRO 2 - Sistema de custos rodoviários – RCTR0320.** Brasília. Data de referência de março de 2016.

DYER, J. S. **Remarks on the analytic hierarchy process.** Journal Management Science. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Linthicum, Maryland, USA. 1990. 36v. 249 – 258p.

ELLPAG - FEHRL (FORUM OF EUROPEAN NATIONAL HIGHWAY RESEARCH LABORATORIES – EUROPEAN LONG-LIFE PAVEMENT GROUP). **Making best use of long-life pavements in Europe – Phase 1: A guide to the use of long-life fully-flexible pavements.** Brussels (Belgium). 2004.

EAPA - EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Long-life asphalt pavements - Technical version.** Brussels: United Kingdom, 2007.

ECOINVENT, 2010. **Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent Centre)**. Ecoinvent Database. Ecoinvent Centre, Dübendorf, 2010. Disponível em <www.ecoinvent.org>. Acesso em 09 de julho de 2016.

EPPS, J. A.; LEAHY, R. B.; MITCHELL, T.; ASHMORE, C.; SEEDS, S.; ALAVI, S.; MONISMITH, C. L. **The road to performance-related specifications**. WesTrack Interim Rep., Reno, Nev. 1999.

ESTAKHRI, C. K.; SAYLAK, D. **Reducing greenhouse gas emissions in Texas with high-volume fly ash concrete**. Transp. Res. Rec, 2005.167–174p.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Life cycle assessment - A guide to approaches, experiences and information sources**. United Kingdom, 1997.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida dos produtos**. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Division of maintenance pavement program. Life cycle cost analysis procedures manual**. California, 2013.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Office of asset management. Life-cycle cost analysis primer**. 2002.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Highway statistics 2007**. Disponível em <<http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2007/>> Acesso em 8 de julho de 2016.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION 2013. Disponível em <<https://www.fhwa.dot.gov/policy/2013cpr/>> Acesso em 14 de agosto de 2016.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Conditions and performance report 2015**. Disponível em <<https://www.fhwa.dot.gov/policy/2013cpr/>> e citado em: <www.artba.org/government-affairs/policy-statements/highways-policy/>. Acesso em 03 de julho de 2016.

GEIPOT - EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Anuário estatístico dos transportes 1982**. 714p. Ministério dos Transportes – Brasília. 1982.

GOSSE, C.; SMITH, B.; CLARENS, A. **Environmentally preferable pavement management systems**. Journal of Infrastructure Systems, 19(3), 315–325. 2013.

GUINÉE, J. B. **Life cycle assessment: past, present and future**. International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction. July 10-12, Nantes, France. Keynote Address. RILEM Publications, France. 2012.

HOUGHTON, J. T. **Climate Change 2001: The scientific basis is the most comprehensive and up-to-date scientific assessment of past, present and future climate change**, 2001.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Kentucky: Pearson, 2004.

HUANG, Y. H.; BIRD, R.; BELL, M. **A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 14, 197-204, 2009.

HUNT, R. G.; SELLERS, J. D.; FRANKLIN, W. E. **Resource and environmental profile analysis: A life cycle environmental assessment for products and procedures**. 1992.

INSTITUTE, THE ATHENA. **A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential**, Ottawa, ON, Canada. 2006.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse inventories. guidelines for national greenhouse gas inventories**, 1996.

ISO 14040. Environmental management - **Life cycle assessment - Principles and framework**. ISO 14040, International Organization for Standardization, Geneva. 1997.

ISO 14040:2006. **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. 2006.

ISO 14044:2006. **Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines**. 2006.

JOUMARD, R.; GUDMUNDSSON, H.; FOLKESON, L. **Framework for assessing indicators of environmental impacts in the transport sector**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 55-63p. 2011.

KENDALL, A. **Life cycle assessment for pavement: Introduction**. Presentation in Minutes, FHWA Sustainable Pavement Technical Working Group Meeting, April 25-26, 2012, Davis, CA. 2012.

KENDALL, A. **A dynamic life cycle assessment tool for comparing bridge deck designs**. Thesis. Michigan, August 2004.

KEIOLEIAN, G. A.; SPITZLEY D. V. **Sustainability science and engineering**. Elsevier, 2006.

LAPONNI, J. C. **Avaliação de projetos de investimentos**. São Paulo: Unidas. 1996.

LEITE, L. F. M. **Sustentabilidade de pavimentos asfálticos**. SINICESP, 26 de junho de 2013: 1-5p.

MAZON, R. **Em direção a um novo paradigma de gestão ambiental: tecnologias limpas ou prevenção da poluição**. Revista de Administração de Empresas, v. 32, n.2, p.78-98. 1992.

McCARTHY, E. J. **Marketing básico: uma visão gerencial**. Rio de Janeiro: Zahar, 1976.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília, 2011.

MORAN, D. D.; WACKERNAGELA, M.; KITZESA, J. A.; GOLDFINGERA, S. H.; BOUTAUDC, A. **Measuring sustainable development - nation by nation**, *Ecological Economics* v. 64, p. 470-4, 2008.

MDOT – MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Standard specifications for Construction**. MDOT: Ann Arbor. 2003.

MESQUITA, J. C. L. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária estudo de caso - Rodovia BR-262, Miranda - Morro do Azeite – MS**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.

MOTTA, R. S. **Estudo das misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes de consumo energético**. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NAÇÕES UNIDAS - **Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável** - Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio), última edição em 13 de outubro de 2015. Disponível em <<https://sustainabledevelopment.un.org>> Acesso em 13 de março de 2017.

NAKICENOVIC, N.; NAKICENOVIC, N. A.; DAVIDSON, O.; DAVIS, G.; GRÜBLER, A.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; METZ, B.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; SANKOVSKI, A.; SHUKLA, P.; SWART, R.; WATSON, R.; DADI, Z. **Special report on emissions scenarios: a special report of working group iii of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 2000.

NATHMAN, R.; MCNEIL, S.; VAN DAM, T. J. **Integrating environmental perspectives into pavement management: adding the pavement life-cycle assessment tool for environmental and economic effects to the decision-**

making toolbox. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 40–49p. 2009.

OZBAY, K.; BARTIN, B.; YANMAZ-TUZEL, O.; BERECHMAN, J. **Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation.** Transportation Research Part A: Policy and Practice 41v.768-786p. October 2007a.

OZBAY K.; OZMEN-ERTEKIN, D.; BERECHMAN, J. **Contribution of transportation investments to county output.** Transport Policy. Volume 14, Issue 4, July 2007b, Pages 317–329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.03.004>.

PELLECUER, L. **Influence of pavement management on road traffic emissions and associated costs.** Research Gate. Conference Paper. Canadá, May 2016.

PITTA, M. R. **Projeto de juntas em pavimentos rodoviários de concreto.** ET-13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. São Paulo, ABCP, 1998a.

PITTA, M. R. **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA.** ET-97. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. São Paulo, ABCP, 1998b.

QUEIROZ, C. A. V. **Performance prediction models for pavement management in Brazil.** 1981. 317p. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Texas, Austin-Texas, USA.

PENNINGTON, D. W.; POTTING, J.; FINNVEDEN, G.; LINDEIJER, E.; JOL, O.; RYDBERG, T.; REBITZER, G. **Life cycle assessment part 2: current impact assessment practice.** Environment International. 30v. 721-739p. 2004.

RIBEIRO, C. M.; GIANNETI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Avaliação do ciclo de vida (ACV): Uma ferramenta importante da ecologia industrial.** Editora Mandruv. 2007. Disponível em <<http://www.hottopos.com/regeq12/art4.htm>>. Acesso em 14 de julho de 2016.

RODRIGUES FILHO, S. **Estudo econômico comparativo entre tipos de pavimentos**. Campinas, SP, Dezembro de 2006.

SAID, F. M.; BOLONG, N.; GUNGAT, L. **Life cycle assessment of asphalt pavement construction and maintenance – A Review**. 2010.

SAMBERG, S.; BASSOCK; HOLMAN, A. **Method for evaluation of sustainable transportation - Toward a comprehensive approach**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1-8p. 2011.

SANTERO, N. J.; HORVATH, A. **Global warming potential of pavements**. Environmental. Research Letters. 2009.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D., PATERSON, W. D. O. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. world Bank Technical Paper Number 46. The World Bank, Washington, D.C. 1986.

USIRF ROUTES DE FRANCE. **Manuel d'utilisation SEVE. Version 1.3**. Système d'Evaluation des Variantes. Environnementales. Paris, 2016.

SILVA, C. S. S.; NOGUEIRA, J. R. S.; SILVA, M. G.; ORTOLAN, V. K.; MÂNCIO, M. **Avaliação ambiental de processos de pavimentação rígida e flexível a partir da análise do ciclo de vida**. IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, RS. 19 a 21 de maio 2014.

SILVA, M. O. S. **Análises físicos químicas para controle de estações tratamento de esgotos**. São Paulo. 1990.

SILVA, M. G. **Estudo de caso aplicado a cadeia produtiva de asfalto: avaliação dos benefícios econômicos na utilização de material reciclado na restauração de pavimentos**. Fortaleza. 2012.

SPIVEY, J. **VOC emissions from asphalt paving**. Proc., environmental technology verification (ETV) Stakeholder advisory committee meeting, Durham, N.C, 2000.

STRIPPLE, H. **Life cycle assessment of road a pilot study for inventory analysis**. Gothenburg: IVL, 2001.

TOLEDO, J. C. **Qualidade industrial: conceitos, sistemas e estratégias**. São Paulo: Atlas, 1987.

TREVISAN, R. B. **A importância de construções sustentáveis para o meio ambiente e para o homem**. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - USDOT. **Potential impacts of climate change on U.S. Transportation**. National research council (U.S.). Committee on climate change and U. S. Transportation – Transportation Research Board. Washington, 2008.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos**. São Paulo. Anna Blume Editora. 2006.

VAZ, C. R.; VIEGAS; C. V.; MALDONADO, M. U. **Análise do cluster de produção científica sobre o conceito de tecnologias limpas**. Research Gate. Setembro, 2016.

WALLS III, M. R.; SMITH, J. **Life-cycle cost analysis in pavement design**. Washington: FHWA, 1998.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET; G. **Overview and methodology - Data quality guideline for the Ecoinvent database version 3**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. St. Gallen, May, 2013.

WILDE, W. J.; WAALKES, S.; HARRISON, R. **Life cycle cost analysis of Portland cement concrete pavement**. University of Texas at Austin, Austin, Texas. 2001.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Toward a sustainable cement industry. Draft report for World Business Council on Sustainable Development.** Battelle Memorial Institute. 2002.

YU, B.; LU, Q.; XU, J. **An improved pavement maintenance optimization methodology: Integrating LCA and LCCA.** Transportation Research Part A – 55 (2013), 1-11.

ZAUMANIS, M.; JANSEN, J.; SMIRNOVS, J. **Environmental Engineering. Calculation model of energy consumption inventory for comparison of warm mix asphalt and hot mix asphalt.** Maio 19-20, 2011: 1246-1253p.

ZHAN, B.; ZHANG, X. **Study on environmental externality cost of road traffic.** Paper presented at the 2009 international conference on Environmental Science and Information Application Technology, ESIAT 2009, Wuhan. (2009, July 4– July 5).

ZHANG, H.; KEIOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. **An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems. Life-Cycle Civil Engineering** – Biondini & Frangopol (eds) 2008 Taylor & Francis Group, London.908-912p. 2008.

ZHANG, H.; LEPECH, M. D.; KEOLEIAN, G. A.; QIANN, S. **Dynamic life cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration.** Journal of Infrastructure Systems ASCE, December 2007: 299 -309.

ZHANG, H.; KEOLEIAN, G.; LEPECH, M. **Network-level pavement asset management system integrated with life-cycle analysis and life-cycle optimization.** Journal of Infrastructure Systems, 19(1), 99– 107. 2013.

ANEXO A – PLANILHA DE DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DOS PAVIMENTOS AVALIADOS

Geometria da Rodovia		Largura da Faixa (m)	Quantidade de Faixas (unid)	Extensão (m)
		3,60	4	10.000
Distância de Transporte	Asfalto (km)	98,00		
	Cimento (km)	88,90		
	Bota Fora (km)	79,70		
	Empréstimo Terraplenagem (km)	6,50		
	Empréstimo Reforço (km)	7,80		
	Usina Asfalto/Concreto (km)	5,00		
	Material Britado (km)	82,00		

QUANTIDADES PARA CADA PAVIMENTO

PAVIMENTO TIPO A - FLEXÍVEL		Espessura (m)	Volume (m³)	8(T/m³)	T/km
2 S 02 540 51	CBUQ - capa rolamento AC/BC	0,05	7.200	2,40	17.280
2 S 02 540 52	CBUQ - "binder" AC/BC	0,10	14.400	2,40	34.560
5 S 02 230 50	Base de bria graduada B/C	0,20	28.800	2,40	69.120
2 S 02 220 00	Reforço de subleito	0,30	43.200	2,40	103.680
5 S 02 400 00	Pintura de ligação	3	Camadas	432.000	m2
3 S 02 300 00	Imprimação	1	Camadas	144.000	m2

PAVIMENTO TIPO B - SEMI-RÍGIDO INVERTIDO		Espessura (m)	Volume (m³)	8(t/m³)	t/km
2 S 02 540 51	CBUQ - capa rolamento AC/BC	0,05	7.200	2,40	17.280
2 S 02 540 52	CBUQ - "binder" AC/BC	0,06	8.640	2,40	20.736
5 S 02 230 50	Base de bria graduada B/C	0,12	17.280	2,40	41.472
59000	BGTC	0,17	24.480	2,50	61.200
2 S 02 100 00	Reforço de subleito	0,20	28.800	2,00	57.600
5 S 02 400 00	Pintura de ligação	2	Camadas	288.000	m2
3 S 02 300 00	Imprimação	1	Camadas	144.000	m2

PAVIMENTO TIPO C - CONCRETO		Espessura (m)	Volume (m³)	8(t/m³)	t/km
2 S 02 606 50	Concreto de cimento portland com fôrma deslizante AC/BC	0,25	36.000	2,50	90.000
2 S 02 603 50	Sub-base de concreto rolado AC/BC	0,12	17.280	2,30	39.744
05-90-00	BGTC	0,15	21.600	2,00	43.200

BL - barra de ligação (longitudinal)		
Extensão =	10.000	m
P/ 1 barra a cada 50 cm =	20.001	barras
Comprimento=	1,00	m
Total Barras=	20.001	m
Bitola 12,5mm	0,96	kg/m
CA-50	19.261	kg
BT - barra de transferência (transversal)		
Largura total da via	14,40	m
P/ 1 barra a cada 30 cm =	25	barras
Junta a cada 5 m=	2.001	juntas
Total de barras=	50.025	barras
Comprimento=	0,46	m
Total Barras=	23.012	m
Bitola 32mm	6,31	kg/m
CA-25	145.272	kg

ANEXO B – PLANILHA DE QUANTIDADES PARA A CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO NOVO

COD DNT	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	AUX.	VALOR	Tipo A		Tipo B		Tipo C																																																																																																																																																							
									QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)																																																																																																																																																						
2 S 02 540 52	CBUQ - "Binder" AC/BC	T511 T701 E007 E102 E105 E107 E149 E404 1 A 01 390 03 CAP 5070 1 A 00 716 00 1 A 00 717 00 1 A 01 390 53	Encarregado de pavimentação Servente Tratr agrícola Rolo Compactador - Tandem v brat. autoprop. 10,2 t Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t Vassoura mecânica rebocável Vassoura mecânica rebocável Vibroacabadora de Asfalto - sobre esferas Caminhão Basculante - 10 m³ - 15 t Usinagem de CBUQ (Binder) Usinagem de CBUQ (Binder) AC/BC	PRODUÇÃO	75	1	T	246,25	34.560	8.510,417	20.736	5.106.250																																																																																																																																																								
															TRANSPORTE	1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																																																																												
																											TRANSPORTE	1 A 00 716 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																																																																	
																																						TRANSPORTE	1 A 00 717 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																																																						
																																																	TRANSPORTE	1 A 01 390 53	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																																										
																																																													TRANSPORTE	1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																														
																																																																									TRANSPORTE	1 A 00 716 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																																			
																																																																																				TRANSPORTE	1 A 00 717 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																																								
																																																																																															TRANSPORTE	1 A 01 390 53	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																												
																																																																																																											TRANSPORTE	1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																																
																																																																																																																							TRANSPORTE	1 A 00 716 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																																					
																																																																																																																																		TRANSPORTE	1 A 00 717 00	Área comercial	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630																										
																																																																																																																																													TRANSPORTE	1 A 01 390 53	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630														
																																																																																																																																																									TRANSPORTE	1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	1	207,85	17,280	5.310,630	17,280	5.310,630		

COD DNT	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	AUX.	VALOR	Tipo A		Tipo B		Tipo C		
									QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	
5 S 02 230 50	BASE DE BRITA GRADUADA B/C														
			TS11	Encarregado de pavimentação	H	46,46	0,008264	1	0,3939	238,02	4.100,544	17,280	2.460,326	21,800	3.075,408
			T701	Servente	H	13,36	0,024793	3	0,3312	714,05		428,43		178,51	
	82		E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t	H	97,75	0,006694	0,81	0,6544	192,79		115,68		535,54	
	98		E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	H	118,34	0,006860	0,83	0,8118	197,55		118,53		144,60	
	103		E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	H	165,43	0,006099	0,98	1,3398	233,26		139,95		148,17	
	210		E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	577,79	0,008264	1	4,7751	238,02		178,51		174,94	
	210		E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	H	120,88	0,006446	0,78	0,7792	185,65		111,39		139,24	
			1 A 01 385 01	Usinagem de brita graduada BC	M3	102,62	1,000000	1	102,6200	28,800,00		17,280,00		21,600,00	
			1 A 01 385 01	Usinagem de brita graduada BC			2,400000			69,120,00		41,472,00		51,840,00	
05-90-00 BASE DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO - BGTC															
		TS11	Encarregado de pavimentação	H	46,46	0,006711	1	0,3118		-	24,480	3.647,520		-	
		T701	Servente	H	80,17	0,040268	6	3,2283				164,30			
	82	E102	Rolo compactador - Tandem Vibr. Auto propelido 10,2 t	H	94,74	0,005235	0,78	0,4960				985,77			
	98	E105	Rolo compactador de pneus Auto propelido 25 t	H	101,15	0,004631	0,69	0,4684				128,15			
	243	E160	Fresadora e distribuidora de solo para regularizar subleito	H	186,04	0,002349	0,35	0,4370				113,36			
	210	E404	Caminhão basculante 10m3 - 15t	H	291,86	0,006711	1	1,9588				57,50			
	210	E407	Caminhão tanque 10.000l	H	127,48	0,005570	0,83	0,7101				164,30			
		1 A 01 653 50 -	Usinagem p/ sub-base de concreto rolado AC/BC	M3	195,16	1,000000	1	195,1600				136,37			
TRANSPORTE		1 A 00 717 00	Brita comercial			2,280000						24,480,00			
TRANSPORTE		1 A 01 653 50 -	Usinagem p/ sub-base de concreto rolado AC/BC			2,400000						58,752,00			
2 S 02 100 00 Reforço de subleito															
		TS11	Encarregado de pavimentação	H	46,46	0,005952	1	0,2765				171,43			
		T701	Servente	H	13,36	0,017857	3	0,2386	0,00		0,00	514,29			
	103	E006	Motobriladeira	H	134,48	0,004643	0,78	0,6244	0,00		0,00	133,71			
	74	E007	Trator agrícola	H	45,81	0,003095	0,52	0,1418	0,00		0,00	89,14			
	82	E013	Rolo Compactador - pé de carneiro autop. 11,25 t vibrat	H	114,82	0,005952	1	0,6835	0,00		0,00	171,43			
		E101	Grade de Discos - GA 24 x 24	H	1,71	0,003095	0,52	0,0053	0,00		0,00	89,14			
	98	E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	H	112,20	0,004643	0,78	0,5209	0,00		0,00	133,71			
	210	E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	220,75	0,005952	1	1,3140	0,00		0,00	171,43			
	210	E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	H	178,50	0,003214	0,54	0,5738	0,00		0,00	92,57			
		1 A 01 100 02	Limpeza camada vegetal em jazida (const e restr.)	M2	0,45	0,700000	0,7	0,3150	0,00		0,00	20,160,00			
		1 A 01 105 01	Expurgo de jazida (const e restr)	M3	2,37	0,200000	0,2	0,4740	0,00		0,00	5,760,00			
		1 A 01 120 01	Escav. e carga de mater. de jazida(const e restr)	M3	3,64	1,500000	1,15	4,1860	0,00		0,00	33,120,00			
TRANSPORTE		1 A 01 120 01	Escav. e carga de mater. de jazida(const e restr)			1,840000			0,00			52,992,00			
2 S 02 220 00 BASE ESTABILIZADA GRANULOMETRICAMENTE C/ MIST. SOLO-BRITA															
		TS11	Encarregado de pavimentação	H	46,46	0,008264	1	0,3940							
		T701	Servente	H	13,36	0,024793	3	0,3312	357,02	2.188,944					
	82	E013	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t	H	114,82	0,008264	1	0,9489	1,071,07		0,00				
	98	E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	H	112,20	0,006033	0,73	0,6769	357,02		0,00				
	103	E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	H	152,47	0,006198	0,75	0,9451	260,63		0,00				
	210	E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	220,75	0,007355	0,89	1,6237	267,77		0,00				
	210	E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	H	178,50	0,008264	1	1,4792	317,75		0,00				
		1 A 01 385 02	Usinagem de solo brita	m3	29,63	0,006284	1	1,4792	357,02		0,00				
TRANSPORTE		1 A 01 120 01	Escav. e carga de mater. de jazida(const e restr)			1,540000			43,200,00		0,00				
TRANSPORTE		1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem			0,960000			66,528,00		0,00				
TRANSPORTE		1 A 01 385 02	Usinagem de solo brita			2,400000			103,680,00		0,00				

[illegible]

COD DNT	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	AUX.	VALOR	Tipo A		Tipo B		Tipo C	
									QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)
1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC			PRODUÇÃO		75		T	207,85	17.280	17.280			
		T501	Encargado de turma	H	30,91	0,013333	1	0,4121		230,40	230,40			
		T701	Servente	H	13,36	0,106667	8	1,4251		1.843,20	1.843,20			
		E010	Carregadeira de Pneu - 3,3 m3	H	74,62	0,003467	0,26	0,2587		59,90	59,90			
		E110	Tanque de Estocagem de Asfalto - 30.000 l	H	39,44	0,013333	1	0,5259		230,40	230,40			
		E112	Aquecedor de Fluido Térmico	H	102,68	0,013333	1	1,3691		230,40	230,40			
		E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 t/h com filtro de manga	H	203,47	0,013333	1	2,7129		230,40	230,40			
		E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA	H	22,72	0,013333	1	0,3029		230,40	230,40			
		E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	H	92,76	0,013333	1	1,2588		230,40	230,40			
		M003	Óleo combustiv el 1A	L	2,10	8,000000	8	16,8000		138.240,00	138.240,00			
		M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com SBS	TON	2.530,33	0,055000	0,055	139,1682		950,40	950,40			
		M905	Filar	KG	0,15	28,000000	28	4,2000		483.840,00	483.840,00			
		1 A 00 716 00	Areia comercial	M3	77,64	0,053300	0,0533	4,1489		921,02	921,02			
		1 A 00 717 00	Brita comercial	M3	61,41	0,558000	0,558	34,2688		9.642,24	9.642,24			
		Limpeza e enchim. junta pav. contr.(const e res)			PRODUÇÃO	450		M	3,28				29.880	
1 A 02 702 00		T511	Encargado de pavimentação	H	30,91	0,002222	1	0,0687					66,40	
		T701	Servente	H	13,36	0,013333	6	0,1781					396,40	
		E208	Compressor de Ar - 200 PCM	H	59,47	0,002222	1	0,1322					66,40	
		E334	Saladora de Juntas	H	167,82	0,002222	1	0,3729					66,40	
		E340	Jateadora de Areia - pressurizado	H	16,75	0,002222	1	0,0372					66,40	
		E422	Caminhão Tanque - 8.000 l	H	59,20	0,001111	0,5	0,0658					33,20	
		M623	Gás propano	KG	3,58	0,030000	0,03	0,1074					896,40	
		M976	Bagete limitador de polímero	M	1,21	1,000000	1	1,2100					29.880,00	
		M977	Séante asfáltico polimerizado	L	2,27	0,420000	0,42	0,9534					12.545,60	
		Brita comercial			PRODUÇÃO				61,41	99.717	84.308		87.810	
		AM35	Brita 1	M3	62,36	0,333300	0,3333	20,7846		33.235,72	28.099,85		29.200,28	
		AM36	Brita 2	M3	61,07	0,333300	0,3333	20,3546		33.235,72	28.099,85		29.200,28	
1 A 00 716 00	Areia comercial	AM37	Brita 3	M3	60,60	0,333400	0,3334	20,2707		33.245,69	28.108,28		29.200,04	
		PRODUÇÃO			PRODUÇÃO	1		M3	77,84	6.485	4.260		21.708	
		M704	Areia lavada	M3	77,84	1,000000	1	77,8400		6.485,18	4.259,52		21.708,00	
1 A 01 170 01	Areia extraída com escavadeira hidráulica	PRODUÇÃO			PRODUÇÃO	49		M3	7,95	6.485	4.260		21.708	
		T501	Encargado	H	30,91	0,020408	1	0,6308		132,35	86,93		443,02	
		T701	Servente	H	13,36	0,081633	4	1,0906		529,40	347,72		1.772,08	
		E016	Carregadeira de Pneu - 1,91 m3	H	70,60	0,008571	0,42	0,6051		55,59	36,51		186,07	
		E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 600' p/ longo alcance	H	221,00	0,020408	1	4,5102		132,35	86,93		443,02	
		M980	Indenização de jazida	M3	0,01	1,000000	1	0,0100		6.485,18	4.259,52		21.708,00	
		PRODUÇÃO			PRODUÇÃO	66		M3	32,89	127.365	84.308		87.810	
		T512	Encargado de bitagem	H	46,45	0,015152	1	0,7038		1.929,77	1.277,39		1.327,42	
		T701	Servente	H	13,36	0,121212	8	1,6194		15.438,20	10.219,15		10.619,15	
		E010	Carregadeira de Pneu - 3,3 m3	H	70,74	0,003636	0,24	0,2572		463,15	306,57		316,58	
1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	E225	Conjunta de Briagem - 80 m3/h	H	620,65	0,015152	1	9,4038		1.929,77	1.277,39		1.327,42	
		E504	Grupo Gerador - 288 KVA	H	138,19	0,015152	1	2,0938		1.929,77	1.277,39		1.327,42	
		1 A 00 983 00	Pecas de Desgaste do Britador 80m3/h	C/H	149,15	0,015200	0,0152	2,2871		1.935,95	1.281,48		1.331,67	
		1 A 01 150 01	Rochia p/ briagem c/ perfur. sobre esteira	M3	26,96	0,570000	0,57	15,3672		72.598,12	48.055,54		49.837,47	
		PRODUÇÃO			PRODUÇÃO	1		KG	3,23				19,261	62.213
		AM04	Apo D=6,3 mm CA 50	KG	3,14	0,500000	0,5	1,5700					43.804,80	
		AM05	Apo D=10 mm CA 50	KG	3,32	0,500000	0,5	1,6600					43.804,80	
		PRODUÇÃO			PRODUÇÃO	1		KG	3,38				145,272	491.500
		AM01	Apo D=4,2 mm CA 25	KG	3,66	0,333300	0,3333	1,2189					48.419,02	
		AM02	Apo D=6,3 mm CA 25	KG	3,25	0,333300	0,3333	1,0632					48.419,02	
1 A 00 301 00	Fornecimento de Aço CA-25	AM03	Apo D=10 mm CA 25	KG	3,24	0,333400	0,3334	1,0802					48.433,55	

COD DNIT	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	AUX.	VALOR	Tipo A		Tipo B		Tipo C	
									QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)
1 A 00 002 04	Transporte Local CBUQ c/ capamba térmica													
	136	E401	Caminhão Carrocetia - caminhão c/ capamba térmica	H	95,99	0,010417	1	0,9957	1,00	521,751	384,882	383,238		
		1 A 99 004 00	Mistura betuminosa usinada a quente	TON		0,010417	1	0,0000		5.434,91	4.009,19			
1 A 00 002 05	Transp. local c/ basec. 10m3 rodov. pav. (const)													
	210	E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	133,52	0,003953	1	0,8277	0,53	5.418,420	8.154,391	4.303,455	9.454,385	4.989,524
1 A 00 002 50	Transporte local c/ betoneira rodov. pav													
	205	E427	Caminhão Betoneira - 11,5 t 15m3	H	140,10	0,005780	1	0,8098	0,81	0	0	-	639,360	517,771
											0,00		3.695,72	
										24.294,446		22.213,330		25.846,420

CODIGO	RESUMO DAS QUANTIDADES DOS SERVIÇOS				
	SERVIÇO	UNIDADE	TIPO A	TIPO B	TIPO C
M003	Óleo combustível 1A	l	414.720	304.128	-
M101	CAP 50/70	t	1.728	1.037	-
M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com SBS	t	950	950	-
M103	Fornecimento de Imprimação CM 30	t	173	173	-
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C	t	173	115	-
M201	Cimento portland CP II-32(a granel)	kg	-	2.448.000	15.753.600
M319	Arame recozido nº. 18	kg	-	-	173
M604	Aditivo plastiment BV-40	kg	-	-	44.280
M620	Protetor de cura do concreto	kg	-	-	181
M623	Gás propano	kg	-	-	896
M704	Areia lavada	m³	6.485	4.260	21.708
M905	Filler	kg	483.840	483.840	-
M949	Disco diamantado serra asfalto SD8-034	u	-	-	0
M976	Baguete limitador de polietileno	m	-	-	29.880
M977	Selante asfáltico polimerizado	l	-	-	12.550
M980	Indenização de jazida	m³	47.957	37.380	21.708
AM01	Aço D=4,2 mm CA 25	kg	-	-	48.419
AM02	Aço D=6,3 mm CA 25	kg	-	-	48.419
AM03	Aço D=10 mm CA 25	kg	-	-	48.434
AM04	Aço D=6,3 mm CA 50	kg	-	-	43.805
AM05	Aço D=10 mm CA 50	kg	-	-	43.805
AM35	Brita 1	m³	33.236	28.100	29.200
AM36	Brita 2	m³	33.236	28.100	29.200
AM37	Brita 3	m³	33.246	28.108	29.209
E002	Trator de Esteiras - com lâmina (108 kW)	h	333	11.178	-
E006	Motoniveladora	h	196	290	-
E007	Trator agrícola	h	359	357	-
E010	Carregadeira de Pneus - 3,3 m3	h	1.406	842	726
E013	Rolo Compactador - pé de carneiro autop. 11,25t vibrat	h	357	171	-
E016	Carregadeira de Pneus - 1,91 m3	h	56	37	186
E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 600l p/ longo alcance	h	132	87	443
E101	Grade de Discos - GA 24 x 24	h	-	89	-
E102	Rolo Compactador - Tanden vibrat. autoprop. 10,2 t	h	580	528	235
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	h	792	593	228
E106	Usina Misturadora - de solos 300 t/h	h	595	143	179
E107	Vassoura mecânica rebocável	h	359	268	-
E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	h	501	140	175
E110	Tanque de estocagem de asfalto 30.000l	h	1.075	806	-
E111	Eq. de distribuição de asfalto - montado em caminhão	h	384	299	-
E112	Aquecedor de Fluido Térmico	h	691	507	-
E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 t/h com filtro de manga	h	691	507	-
E149	Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras	h	560	411	-
E160	Fresadora e distribuidora de solo para regularizar subleito	h	-	58	41
E208	Compressor de Ar - 200 PCM	h	-	-	66
E225	Conjunto de Britagem - 80 m3/h	h	1.930	1.277	1.327
E330	Espalhadora de concreto	h	-	-	140
E331	Acanadora de concreto com forma deslizante	h	-	-	140
E332	Texturizadora e lançadora	h	-	-	51
E333	Serra de disco diamantado	h	-	-	174

CODIGO	RESUMO DAS QUANTIDADES DOS SERVIÇOS				
	SERVIÇO	UNIDADE	TIPO A	TIPO B	TIPO C
E334	Seladora de Juntas	h	-	-	66
E335	Central de Concreto - 180m3 / h - dosadora e misturadora	h	-	164	358
E340	Jateadora de Areia - pressurizado	h	-	-	66
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	h	1.247	985	536
E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	h	543	340	235
E422	Caminhão espargidor - tanque 6000 l	h	-	-	154
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA	h	691	507	-
E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	h	1.286	650	179
E504	Grupo Gerador - 288 KVA	h	1.930	1.442	1.685
E401	Caminhão Carroceria - caminhão c/ caçamba termica	h	5.434,91	4.009,19	-
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	h	21.416,68	32.230,79	37.369,11
E427	Caminhão Betoneira - 11,5 t 5m3	h	-	-	3.695,72

ANEXO C – PLANILHA DE QUANTIDADES PARA A CONSERVAÇÃO PERIÓDICA E RESTAURAÇÃO DO PAVIMENTO

COD	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	QUANT	UTILIZAÇÃO		CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	VALOR	Tipo A1		Tipo B1		Tipo C1				
						OPER.	IMPROD.				QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)			
5 S 02 511 10	Micro-revela fric-Microflex 1,5cm cilíndr cimen	PRODUÇÃO																	
		T511	ENCARRREGADO DE PAVIMENTAÇÃO	H	1				46,45	0,000889	0,0413	M²	8,89	216.000	1.919.799	172.799,98	1.535.839		
		T701	SERVENTE	H	4				13,36	0,003556	0,0475					153,60			
		E007	Trator Agrícola	H	1	0,19	0,81		24,94	0,000169	0,0042				36,48	29,18			
		82	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 l	H	1	0,06	0,94		27,62	0,000053	0,0015				11,52	9,22			
		E107	Visoura Mecânica - rebocável	H	1	0,19	0,81		0,84	0,000169	0,0001				36,48	29,18			
		E110	Tanque de Estocagem de Asfalto - 30.000 l	H	2	1	0		19,71	0,001778	0,0350				384,00	307,20			
		E161	Equip. Distr. de L.A. Rust. Cont. - acoplado a cavalo mecânico	H	1	1	0		296,81	0,000889	0,2638				153,60	107,70			
		E040	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	0,07	1			145,71	0,000062	0,0091				10,75	46,08			
		E406	Caminhão Tanque - 6.000 l	H	1	0,3			40,19	0,000267	0,0107				57,60	48,08			
		M110	Emulsão polim. p/ micro-rev. a frio	TON	0,0029				2.530,33	0,000900	7,34				626,40	501,12			
		M202	Cimento Portland CP 1-32	TON	0,3375				0,44	0,337500	0,15				72.889,59	58.319,99			
		1 A 01 358 03	Usagem de Agregados para Microrevestimento	m3	0,015				34,79	0,001500	0,52				2.592,00	3.240,00			
			Emulsão polim. p/ micro-rev. a frio							0,000900					626,40	501,12			
			Cimento Portland CP 1-32							0,000300					64,80	51,84			
			Usagem de Agregados para Microrevestimento							0,022500					4.860,00	3.888,00			
		5 S 02 300 00	PINTURA DE LIGAÇÃO	PRODUÇÃO															
				T511	ENCARRREGADO DE PAVIMENTAÇÃO	H	1				46,46	0,027540	1,2795	M2	1,26	279.666	353.333	236.465,98	298.754
T701	SERVENTE			H	3				13,36	0,007919	0,1058				7.702,00	6.512,28			
E007	TRATOR AGRÍCOLA			H	1	0,55	0,45		47,51	0,000326	0,0155				1.872,66	2.214,78			
E107	WASSOURA MECÂNICA - REBOCÁVEL			H	1	0,55	0,45		2,43	0,000326	0,0008				91,18	77,09			
E110	TANQUE DE ESTOCAGEM DE ASFALTO - 30.000L			H	2	1	0		39,44	0,001186	0,0468				280,34	260,34			
E111	EQ. DE DISTRIBUIÇÃO DE ASFALTO - MONTADO EM			H	1	1	0		126,94	0,000693	0,0752				165,78	140,17			
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C			TON	0,0004				2.588,53	0,000400	1,0234				94,59	94,59			
	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C									0,000400					111,87	94,59			
3 S 02 300 00	IMPRIMAÇÃO			PRODUÇÃO															
				T511	ENCARRREGADO DE PAVIMENTAÇÃO	H	1				46,46	0,041298	1,9187	M2	1,80	1.526	3.465	1.926,00	3.465
				T701	SERVENTE	H	3				40,08	0,035627	1,4279				68,62	79,54	
				E007	TRATOR AGRÍCOLA	H	1	0,41	0,59		39,59	0,000364	0,0144				0,70	0,70	
				E107	WASSOURA MECÂNICA - REBOCÁVEL	H	1	0,41	0,59		1,81	0,000364	0,0007				0,70	0,70	
				E110	TANQUE DE ESTOCAGEM DE ASFALTO - 30.000L	H	2	1			39,44	0,001778	0,0701				3,42	3,42	
				E111	EQ. DE DISTRIBUIÇÃO DE ASFALTO - MONTADO EM	H	1	1			126,94	0,000689	0,1128				1,71	1,71	
				M103	Fornecimento de Imprimação CM 30	TON	0,0012				1.207,40	0,001200	1,4489				2,31	2,31	
					Fornecimento de Imprimação CM 30							0,001200	0,00				2,31	2,31	
		2 S 02 540 51	CBUQ - capa rolimento AC/BC	PRODUÇÃO															
				T511	ENCARRREGADO DE PAVIMENTAÇÃO	H	1				46,45	0,619333	28,7690	T	307,33	10.284	5.610.310	15.692,40	4.822.716
				T701	SERVENTE	H	8				13,36	0,178133	2,3799				9.718,83	9.718,83	
				E007	Trator Agrícola	H	1	0,24	0,76		29,98	0,003200	0,0599				2.795,34	2.795,34	
				E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 l	H	1	0,56	0,44		72,85	0,007467	0,5425				50,22	50,22	
				98	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	H	2	0,29	0,71		104,06	0,007733	0,8047				121,35	121,35	
				E107	Visoura Mecânica - rebocável	H	1	0,24	0,76		1,06	0,003200	0,0034				17,17	17,17	
				E149	Wiro-escaladora de Asfalto - sobre esteiras	H	1	0,81	0,19		126,13	0,010800	1,3622				50,22	50,22	
				E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	1,53	1	0		226,67	0,020400	4,6241				169,48	169,48	
1 A 01 359 52	Usagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC			TON	1				207,85	1,000000	207,8492				373,00	373,00			
	CAP 65-90 modificado por polímero com SBS														15.692,40	15.692,40			
TRANSPORTE	Fier									0,055000					1.005,64	863,08			
TRANSPORTE	Área comercial									0,028000					511,96	459,39			
TRANSPORTE	1 A 00 717 00									0,080000					1.482,75	1.255,39			
TRANSPORTE	1 A 01 359 52									0,837000					15.304,04	13.134,54			
	Usagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC									1,000000					18.284,40	15.692,40			

COD	POTENCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVICO	UNID	QUANT	UTILIZACAO		CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	VALOR	Tipo A1		Tipo B1		Tipo C1		
						OPER	IMPROD.				QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	
5 S 02 230 50	BASE DE BRITA GRADUADA B/C																
		T511	ENCARREGADO DE PAVIMENTACAO	PRODUCAO	H	1		46,45	121	M3	142,38	289	41,134	288,90	41,134		
		T701	SERVENTE		H	3		13,36	0,024793		0,002645	2,39		2,39			
	82	E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t		H	1	0,81	97,75	0,00694		0,0247934	7,16		7,16			
	98	E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t		H	1	0,83	118,34	0,00860		0,002645	1,93		1,93			
	103	E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido		H	1	0,98	165,43	0,00899		0,002645	1,98		1,98			
	210	E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t		H	3,9	1	577,79	0,03231		0,002645	2,34		2,34			
	210	E407	Caminhão Tanque - 10.000 l		H	1	0,78	120,88	0,00646		0,03233 14	9,31		9,31			
		1 A 01 395 01	Usinagem de brita graduada BC		M3	1		102,62	1,00000		0,002645	1,86		1,86			
	TRANSPORTE		Usinagem de brita graduada BC						2,40000		693,36		693,36				
	5 S 02 390 11	Fresagem continua do revest. Betuminoso															
		T501	ENCARREGADO TURMA		PRODUCAO	H	1		26,73	20	M3	136,54	5,047	688,145	4,327,20	590,836	
		T701	SERVENTE	H		8		13,36	0,40000		0,050000	252,36		216,36			
410		E127	Fresadora a Frio	H		1	1	1.065,42	0,05000		53,27		0,050000	2,018,88			
45		E156	Carregadeira de Pneus - c/ vasouras SPS 155 DA AGF	H		1	0,5	39,86	0,02500		1,00		0,050000	126,18			
210		E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H		1,08	1	157,38	0,05400		8,50		0,054000	272,55			
136		E406	Caminhão Tanque - 6.000 l	H		1	0,24	35,28	0,01200		0,42		0,050000	60,57			
		M349	Dente p/ fresadora W1900	H		0,88		22,51	0,04400		0,99		0,050000	222,08			
		M350	Porta dente p/ fresadora W1900	H		0,0515		209,76	0,002575		0,54		13,00	11,14			
		M378	Apoio do porta dente fresad. W 200	KG		0,0085		949,67	0,004125		0,40		2,15	1,84			
TRANSPORTE			Materiais fresado						2,40000		0,40000		12,113,28	10,385,28			
COMP	Fresagem mecanica de pavimento de concreto																
		T501	ENCARREGADO TURMA	PRODUCAO	H	0,149		26,73	1	M2	9,86				144,000,00	1,420,423	
		T701	SERVENTE		H	0,149		13,36	0,14900		3,98		0,149000		21,456,00		
	410	E127	Fresadora manual para piso de concreto.		H	0,174		12,08	0,17400		2,10		0,174000		21,456,00		
	45	E156	Grupo eletrogeno insonorizado, trifasico, de 45 kVA de potencia		H	0,174		10,28	0,17400		1,79		0,174000		25,056,00		
	TRANSPORTE		Materiais fresado						2,40000		0,174000		10,388,00				
	Recomposicao de placa de concreto																
		T511	Encarg. de pavimentacao		PRODUCAO	H	1		46,45	4,3	m3	435,42				720,00	313,592
		T604	PEDRERO	H		1		16,24	0,23258		10,80		0,232581		167,44		
		T701	SERVENTE	H		10		13,36	2,32581		3,78		0,232581		167,44		
		E208	Compressor de Ar - 200 PCM	H		1	0,60	39,03	0,19835		5,45		0,232581		100,47		
	E209	Martelete - rompido 28kg	H	2		0,60	23,03	0,279070		6,43		0,4851163		200,93			
	E306	Vibrador de concreto - de mesa	H	1		0,30	11,29	0,089767		0,79		0,232581		50,23			
	E343	Betoneira 600l	H	1		1,00	24,71	0,23258		5,75		0,232581		167,44			
	E400	Caminhão basculante - 5 m3 - 8,8 t	H	0,06		1,00	5,12	0,019853		0,07		0,0198535		10,05			
	E914	Compactador manual - placa vibratória com motor	H	1		0,30	11,86	0,23258		2,76		0,232581		167,44			
	M202	Cimento Portland cp II-32	KG	345			0,41	345,00000		141,45				248,400,00			
TRANSPORTE		1 A 01 170 02	Area extraída com escavadora hidraulica	PRODUCAO	M3	0,5		5,37	0,50000		2,69			360,00			
		1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h		M	0,7		29,89	0,70000		20,92			504,00			
	TRANSPORTE		Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h						0,70000		0,00			540,00			
	TRANSPORTE		Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h						1,05000		0,00			756,00			
1 A 02 702 00	Limpeza e enchimento de junta pav. concre (constr e rest)																
		T511	ENCARREGADO DE PAVIMENTACAO	PRODUCAO	H	1		30,91	450	M	3,28				129,800,00	425,688	
		T701	SERVENTE		H	6		13,36	0,00222		0,07		0,002222		1,60		
	56	E208	Compressor de Ar - 200 PCM		H	1	1,00000	0,00000	0,01333		0,18		0,013333		9,60		
	6	E334	Seleção de Juntas		H	1	1,00000	59,47	0,00222		0,13		0,002222		1,60		
		E340	Jaleco de Area - pressurizado		H	1	1,00000	167,82	0,00222		0,37		0,002222		1,60		
	136	E422	Caminhão Tanque - 8.000 l		H	1	0,50000	16,75	0,00222		0,04		0,002222		1,60		
		M623	Gas proprio		KG	1	0,50000	59,20	0,01111		0,07		0,002222		0,80		
		M976	Bagueite limitador de polietileno		M	1		3,58	0,00222		0,01				1,60		
		M977	Selante asfáltico polimerizado		L	1		2,27	0,00222		0,01				1,60		

COD	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	QUANT	UTILIZAÇÃO		CUSTO UNIT. INSUMOS (R\$)	COEF.	VALOR	Tipo A1		Tipo B1		Tipo C1	
						OPER.	IMPROD.				QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)
ATIVIDADES AUXILIARES																
PRODUÇÃO																
1 A 01 395 03	Usinagem de Agregados para Microrevestimento															
		T501	ENC-ARREGADO DE TURMA	H	1			30,91	0,006024	0,1862	373		320,12		-	
		T701	SERVEENTE	H	5			13,36	0,030120	0,4024			1,74		-	
	147	E010	Cargadeira de Pneu - 3,3 m3	H	1	0,79	0,21	214,01	0,004759	1,0185			9,64		-	
	99	E106	Usina Misturadora - de solos 300 th	H	1	1	0	108,72	0,006024	0,6549			1,37		-	
	144	E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	H	1	1	0	92,76	0,006024	0,5588			1,74		-	
		1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	M3	1			32,89	1,000000	32,8900			288,90		-	
1 A 01 395 51	Usinagem de brita graduada BC															
		T512	Encargado de britagem	H	1			30,91	0,006264	0,2555	289	102,62	289,90		-	
		T701	SERVEENTE	H	5			13,36	0,041322	0,5521			2,39		-	
	147	E010	Cargadeira de Pneu - 3,3 m3	H	1	0,98	0,02	214,01	0,006099	1,7333			11,94		-	
	99	E106	Usina Misturadora - de solos 300 th	H	1	1	0	108,72	0,006264	0,6965			2,34		-	
	144	E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	H	1	1	0	92,76	0,006264	0,7666			2,39		-	
		1 A 00 717 00	BRITA COMERCIAL	M3	1,6			61,41	1,600000	98,2560			462,24		-	
1 A 01 390 52	Usinagem de CBUQ (capa de rolamento) AC/BC															
		T501	Encargado de turma	H	1			30,91	0,013333	0,4121	18,284	207,85	15,692,40		-	
		T701	SERVEENTE	H	8			13,36	0,106697	1,4251			243,79		-	
	147	E010	Cargadeira de Pneu - 3,3 m3	H	1	0,26	0,74	74,62	0,003467	0,2587			1,673,96		-	
		E110	Tanque de Estocagem de Asfalto - 30.000 l	H	1	1	0	39,44	0,013333	0,5259			63,39		-	
	12	E112	Aquecedor de Fluido Térmico	H	2	1	0	102,68	0,006667	2,7381			209,23		-	
	188	E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 th com filtro de mangia	H	1	1	0	203,47	0,013333	2,7129			418,46		-	
	32	E501	Grupo Gerador - 3640 KVA	H	1	1	0	22,72	0,013333	0,3029			209,23		-	
	144	E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	H	1	1	0	92,76	0,013333	1,2588			209,23		-	
		M003	Óleo combustível 1A	L	8			2,10	8,000000	16,8000			146,275,19		-	
		M1000	CAP 6590 modificado por polímero com SBS	TON	0,055			2.530,33	0,055000	139,1682			863,08		-	
		M905	Filler	KG	28			0,15	28,000000	4,2000			1,005,64		-	
		1 A 00 716 00	Área comercial	M3	0,0533			77,84	0,053300	4,1489			439,397,16		-	
		1 A 00 717 00	Brita Comercial	M3	0,0558			61,41	0,055800	3,4267			856,40		-	
1 A 00 717 00	PRODUÇÃO															
		AM35	Brita 1	M3	0,3333			62,36	0,333300	20,7946	1,483	61,41	1,337,88		504,00	
		AM36	Brita 2	M3	0,3333			61,07	0,333300	20,3546			494,12		167,98	
		AM37	Brita 3	M3	0,3334			60,60	0,333400	20,2707			494,27		168,03	
1 A 00 716 00	PRODUÇÃO															
		M704	Área lavada	M3	1			77,84	1,000000	77,8400	975	77,84	836,40		360,00	
1 A 01 170 01	Área extraída com escavadeira hidráulica															
		T501	Encargado	H	1			30,91	0,020408	0,6308	975	7,95	836,40		360,00	
		T701	SERVEENTE	H	4			13,36	0,081633	1,0506			17,07		7,35	
	0,97	E016	Cargadeira de Pneu - 1,91 m3	H	1	0,42	0,58	70,60	0,008571	0,6051			68,28		29,39	
	2,10	E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 6000 p/ longo alcance	H	1	1	0	221,00	0,020408	4,5102			7,17		3,09	
		M960	Indenização de jazida	M3	1			0,01	0,020408	0,0002			17,07		7,35	
1 A 01 200 01	Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h															
		T512	Encargado de britagem	H	1			46,45	0,015152	0,7038	1,483	32,09	1,337,88		504,00	
		T701	SERVEENTE	H	8			13,36	0,121212	1,6194			22,46		7,64	
	0,53	E010	Cargadeira de Pneu - 3,3 m3	H	1	0,24	0,76	70,74	0,008636	0,2572			162,17		61,09	
	4,18	E225	Conjunt. de Britagem - 80 m3/h	H	1	1	0	620,65	0,015152	9,4038			4,87		1,83	
	3,48	E504	Grupo Gerador - 288 KVA	H	1	1	0	138,19	0,015152	2,0598			20,27		7,64	
		1 A 00 963 00	Pedras de Desgaste do Britador 80m3/h	C/H	0,0152			149,15	0,000200	0,0343			0,34		0,12	
		1 A 01 150 01	Rocha p/ britagem c/ perfil. sobre esteira	M3	0,57			26,96	0,008636	0,2328			11,55		4,35	

COD	POTÊNCIA (KW)	COD. INSUMO	SERVIÇO	UNID	QUANT	UTILIZAÇÃO		COEF.	VALOR	Tipo A1		Tipo B1		Tipo C1	
						OPER.	IMPROD.			QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)	QUANT.	VALOR (R\$)
1 A 00 002 04	Transporte Local CBUQ c/ capamba térmica			PRODUÇÃO				96	TKM	1,07	286.851	307.529	241.088,74	238.488	
	136	E401	Caminhão Carroceria - caminhão c/ capamba térmica	H	1	1	0	0,010417	1,0721						
		1 A 99 004 00	Mistura betuminosa utilizada a quente	TON						2,980,04		2,511,135			
1 A 00 002 05	Transp. local c/ basec. 10m3 rodov. pav. (const)			PRODUÇÃO				253	TKM	1,07	2.595.008	2.685.577	2.148.111,25	2.302.954	998.827
	210	E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	1	1	0	0,010417	1,0721			26.038,83	22.376,16	932.601,60	977.14,60
1 A 00 002 50	Transporte local c/ betoneira rodov. pav			PRODUÇÃO				173	TKM	1,46					-
	205	E427	Caminhão Betoneira - 11,515m3	H	1	1	0	0,010417	1,4594					-	
											11.612,291		9.854,165		3.158.840

CODIGO	RESUMO DAS QUANTIDADES DOS SERVIÇOS				
	SERVIÇO	UNIDADE	TIPO A	TIPO B	TIPO C
M003	Óleo combustível 1A	L	146.275,19	125.539,19	-
M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com SBS	TON	1.005,64	863,08	-
M103	Fornecimento de Imprimação CM 30	TON	2,31	2,31	-
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C	TON	111,87	94,59	-
M623	Gás propano	KG	-	-	1,60
M704	Areia lavada	M3	974,56	836,40	360,00
M905	Filler	KG	511.963,15	439.387,16	-
M976	Baguete limitador de polietileno	M	-	-	1,60
M977	Selante asfáltico polimerizado	L	-	-	1,60
M980	Indenização de jazida	M3	19,89	17,07	7,35
AM35	Brita 1	M3	494,12	445,91	167,98
AM36	Brita 2	M3	494,12	445,91	167,98
AM37	Brita 3	M3	494,27	446,05	168,03
E007	Trator Agrícola	H	186,87	157,19	-
E010	Carregadeira de Pneus - 3,3 m3	H	72,49	63,13	1,83
E016	Rolo Compactador - Tanden vibrat. autoprop. 10,2 t	H	19,87	16,39	3,09
E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 600l p/ longo alcance	H	19,89	17,07	7,35
E102	Rolo Compactador - Tanden vibrat. autoprop. 10,2 t	H	138,46	119,10	-
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	H	143,38	123,34	-
E106	Usina Misturadora - de solos 300 t/h	H	4,13	4,32	-
E107	Vassoura Mecânica - rebocável	H	186,87	157,19	-
E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	H	2,34	2,34	-
E110	Tanque de Estocagem de Asfalto - 30.000 l	H	962,77	800,19	-
E111	EQ. DE DISTRIBUIÇÃO DE ASFALTO - MONTADO EM CAMINHÃO	H	167,49	141,88	-
E112	Aquecedor de Fluido Térmico	H	487,58	418,46	-
E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 t/h com filtro de manga	H	243,79	209,23	-
E149	Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras	H	197,47	169,48	-
E208	Compressor de Ar - 200 PCM	H	-	-	102,07
E225	Conjunto de Britagem - 80 m3/h	H	22,46	20,27	7,64
E334	Seladora de Juntas	H	-	-	1,60
E340	Jateadora de Areia - pressurizado	H	-	-	1,60
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	668,30	573,86	-
E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	H	1,86	1,86	-
E422	Caminhão Tanque - 8.000 l	H	-	-	0,80
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA	H	243,79	209,23	-
E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	H	247,92	213,55	-
E504	Grupo Gerador - 288 KVA	H	22,46	20,27	7,64
E401	Caminhão Carroceria - caminhão c/ caçamba termica	H	2.988,04	2.511,35	-
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	H	26.093,83	22.376,16	9.714,60

ANEXO D – LCA - MÓDULO 1 – QUANTIDADE DE ENERGIA PRIMÁRIA E EMISSIONES PARA PRODUÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Código SICRO2	Serviço	Fonte	Quantidade de Energia (MJ/t)	Quantidade de Materiais (t)			Quantidade de Energia (MJ)		
				Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
M003	Óleo combustível 1A	SIMAPRO	0,1	476.846	365.217	-	47.685	36.522	-
M101	CAP 50/70	SIMAPRO	682	1.728	1.037	-	1.178.866	707.320	-
M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com SE	SIMAPRO	724	1.956	1.813	-	1.416.222	1.313.005	-
M1003	Fornecimento de Imprimação CM 30	SIMAPRO	1.003.878	175	175	-	173.470.261	173.470.261	-
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C	SIMAPRO	1.003.878	285	210	-	173.475.760	115.651.511	-
M201	Cimento portland CP II-32(a granel)	SIMAPRO	5.161	-	2.448	15.754	-	12.634.593	81.307.323
M704	Areia lavada	SIMAPRO	96	17.903	12.230	52.963	1.716.261	1.172.418	5.077.179
M905	Filler	SIMAPRO	5.161	1.713	1.538	-	8.838.804	7.939.816	-
M976	Bagete limitador de polietileno	Boustead L., 1993	91.550	-	-	119	-	-	10.915.285
M977	Selante asfáltico polimerizado	SIMAPRO	50	-	-	30	-	-	1.512
AM01/AM02/AM3	Aço CA-25	: IES, Zurich, Switzerland, 1	25.310	-	-	145	-	-	3.676.824
AM04/AM05	Aço CA-50	: IES, Zurich, Switzerland, 1	25.310	-	-	88	-	-	2.217.399
AM35/AM36/AM37	Brita 1, 2 e 3	: IES, Zurich, Switzerland, 1	96	242.879	205.550	211.473	23.282.974	19.704.519	20.272.275
Total				383.426.833	332.629.964				123.467.798

Código SICR02	Serviço	CO2			N2O			CH4		
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
M003	Óleo combustível 1A	1,91E+06	1,46E+06							
M101	CAP 50/70	5,94E+07	3,58E+07		9,58E+01	5,74E+01		1,86E+01	1,11E+01	
M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com St	6,72E+07	6,23E+07		1,24E+01	1,15E+01		4,15E+00	3,84E+00	
M103	Fornecimento de Imprimação CM 30	3,13E+07	3,13E+07		6,82E+00	6,82E+00		3,92E+01	3,92E+01	
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C	5,09E+07	3,75E+07		1,11E+01	8,17E+00		6,37E+01	4,70E+01	
M201	Cimento Portland C/P II-32(a granel)		1,97E+09	1,27E+10		4,01E+02	2,58E+03		1,34E+02	8,60E+02
M704	Areia lavada	2,67E+07	1,83E+07	7,91E+07	7,51E+01	5,13E+01	2,22E+02	6,87E+02	4,70E+02	2,03E+03
M905	Filler	1,38E+09	1,24E+09		2,81E+02	2,52E+02		9,35E+01	8,40E+01	
M976	Baguete limitador de polietileno			1,31E+08						
M977	Selante asfáltico polimerizado			5,38E+06			1,17E+00			6,74E+00
AM01/AM02/AM3	Aço CA-25			3,21E+08			4,43E+03			1,32E+06
AM04/AM05	Aço CA-50			1,94E+08			2,67E+03			7,99E+05
AM35/AM36/AM37	Brita 1, 2 e 3	3,63E+08	3,07E+08	3,16E+08	1,02E+03	8,63E+02	8,87E+02	9,33E+03	7,89E+03	8,12E+03
Total		1,98E+09	3,71E+09	1,38E+10	1,50E+03	1,65E+03	1,08E+04	1,02E+04	8,68E+03	2,13E+06

Código SICRO2	Serviço	Partículas			DBO			DQO		
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
M003	Óleo combustível 1A	229	175	-	-	-	-	572	438	-
M101	CAP 50/70	6.557	3.934	-	1.970	1.182	-	35.803	21.482	-
M1000	CAP 65/90 modificado por polímero com SE	951	881	-	2.230	2.067	-	40.490	37.539	-
M103	Fornecimento de Imprimação CM 30	1.786	1.786	-	3.152	3.152	-	60.254	60.254	-
M104	Fornecimento de Pintura de Ligação RR 1C	2.904	2.140	-	5.124	3.776	-	97.950	72.185	-
M201	Cimento portland C/P II-32(a granel)	-	67	430	-	-	-	-	-	-
M704	Areia lavada	9.107	6.221	26.940	-	-	-	383	261	1.132
M905	Filler	47	42	-	-	-	-	-	-	-
M976	Baquete limitador de polietileno	-	-	238.455	-	-	1.788.414	-	-	119.228
M977	Selante asfáltico polimerizado	-	-	307	-	-	542	-	-	10.365
AM01/AM02/AMC Aço CA-25		-	-	5.665.592	-	-	-	-	-	1.361
AM04/AM05	Aço CA-50	-	-	3.416.774	-	-	-	-	-	821
AM35/AM36/AMC Brita 1, 2 e 3		123.540	104.553	107.565	-	-	-	5.190	4.392	4.519
Total		145.119	119.799	9.456.064	12.476	10.177	1.788.956	240.642	196.551	137.425

ANEXO E – LCA - MÓDULO 2 – QUANTIDADE DE ENERGIA PRIMÁRIA E EMISSÕES PARA CONSTRUÇÃO, CONSERVAÇÃO E RESTAURAÇÃO

COD.	Serviço	Quantidade de Energia (kW/h)	Quantidade de Energia (MJ)		
			Tipo A Quant. (h)	Tipo B Quant. (h)	Tipo C Quant. (h)
E002	Trator de Esteiras - com lâmina (108 kW)	108	333	11178	129.414
E006	Motobrilhadora	103	196	290	72.695
E007	Trator agrícola	74	546	514	145.475
E010	Carregadeira de Pneus - 3,3 m3	147	1479	906	782.572
E013	Rolo Compactador - pé de carneiro autop. 11,25t vibrat	82	357	171	105.394
E016	Carregadeira de Pneus - 1,91 m3	113	75	53	30.697
E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 600l p/ longo alcance	103	152	104	56.450
E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t	82	718	647	212.049
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	98	936	716	330.095
E106	Usina Misturadora - de solos 300 t/h	99	599	147	213.544
E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	103	503	142	186.648
E111	Eq. de distribuição de asfalto - montado em caminhão	175	552	441	347.486
E112	Aquecedor de Fluido Térmico	12	1179	925	50.923
E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 t/h com filtro de manga	188	935	716	632.803
E149	Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras	82	757	580	223.588
E160	Fresadora e distribuidora de solo para regularizar subleito	243		58	41
E208	Compressor de Ar - 200 PCM	56			168
E225	Conjunto de Brilegem - 80 m3/h	276	1952	1298	1.335
E330	Espalhadora de concreto	172			140
E331	Acanadora de concreto com forma deslizante	205			140
E332	Texturizadora e lançadora	57			51
E333	Serra de disco diamantado	10			174
E334	Seladora de Juntas	6			68
E335	Central de Concreto - 180m3 / h - dosadora e misturadora	149		164	358
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	210	1915	1559	536
E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	210	545	342	235
E422	Caminhão espargidor - tanque 6000 l	136			155
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA	32	935	716	107.711
E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	144	1534	863	179
E504	Grupo Gerador - 288 KVA	230	1952	1462	1693
Total			9.838.645	11.308.551	4.856.756

COD.	Serviço	Emissões g					
		CO2		N2O		CH4	
		79		0,0016		0,00005	
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
E002	Trator de Esteiras - com lâmina (108 kW)	1,02E+07	3,43E+08		2,07E+02	6,95E+03	6,47E+00
E006	Motoriv eladora	5,74E+06	8,50E+06		1,16E+02	1,72E+02	3,63E+00
E007	Trator agrícola	1,15E+07	1,08E+07		2,33E+02	2,19E+02	7,27E+00
E010	Carregadeira de P neus - 3,3 m3	6,18E+07	3,79E+07	3,04E+07	1,25E+03	7,67E+02	3,91E+01
E013	Rolo Compactador - pé de carneiro autop. 11,25t vibrat	8,33E+06	4,00E+06		1,69E+02	8,10E+01	5,27E+00
E016	Carregadeira de P neus - 1,91 m3	2,43E+06	1,70E+06	6,08E+06	4,91E+01	3,44E+01	1,23E+02
E063	Escavadeira Hidráulica - c/ est. - cap 600l p/ longo alcance	4,46E+06	3,05E+06	1,32E+07	9,03E+01	6,17E+01	2,67E+02
E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t	1,68E+07	1,51E+07	5,48E+06	3,39E+02	3,05E+02	1,11E+02
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t	2,61E+07	2,00E+07	6,36E+06	5,28E+02	4,04E+02	1,29E+02
E106	Usina Misturadora - de solos 300 t/h	1,69E+07	4,14E+06	5,03E+06	3,42E+02	8,39E+01	1,02E+02
E109	Distribuidor de Agregados - autopropelido	1,47E+07	4,17E+06	5,12E+06	2,99E+02	8,44E+01	1,04E+02
E111	Eq. de distribuição de asfalto - montado em caminhão	2,79E+07	2,19E+07		5,56E+02	4,44E+02	1,74E+01
E112	Aquecedor de Fluido Térmico	4,02E+06	3,16E+06		8,15E+01	6,40E+01	2,55E+00
E147	Usina de Asfalto a Quente - 90/120 t/h com filtro de marga	5,00E+07	3,83E+07		1,01E+03	7,75E+02	3,16E+01
E149	Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras	1,77E+07	1,35E+07		3,58E+02	2,74E+02	1,12E+01
E160	Fresadora e distribuidora de solo para regularizar subleito		3,97E+06	2,81E+06		8,05E+01	5,68E+01
E208	Compressor de Ar - 200 PCM			2,68E+06			5,43E+01
E225	Conjunto de Britagem - 80 m3/h	1,53E+08	1,02E+08	1,05E+08	3,10E+03	2,06E+03	2,12E+03
E330	Espalhadora de concreto			6,85E+06			1,39E+02
E331	Acanadora de concreto com forma deslizante			8,17E+06			1,65E+02
E332	Texturizadora e lançadora			8,23E+05			1,67E+01
E333	Serra de disco diamantado			4,95E+05			1,00E+01
E334	Seladora de Juntas			1,16E+05			2,35E+00
E335	Central de Concreto - 180m3 / h - dosadora e misturadora		6,96E+06	1,52E+07		1,41E+02	3,07E+02
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	1,14E+08	9,31E+07	3,20E+07	2,32E+03	1,89E+03	6,48E+02
E407	Caminhão Tanque - 10.000 l	3,25E+07	2,04E+07	1,41E+07	6,59E+02	4,14E+02	2,85E+02
E422	Caminhão esparçador - tanque 6000 l			5,99E+06			1,21E+02
E501	Grupo Gerador - 36/40 KVA	8,51E+06	6,52E+06		1,72E+02	1,32E+02	5,39E+00
E503	Grupo Gerador - 164 / 180 KVA	6,28E+07	3,54E+07	7,31E+06	1,27E+03	7,16E+02	1,48E+02
E504	Grupo Gerador - 288 KVA	1,28E+08	9,56E+07	1,11E+08	2,59E+03	1,94E+03	2,24E+03
T total		777.252.939	893.375.548	383.683.718	15.742	18.094	7.771
					492	565	243

ANEXO F – LCA - MÓDULO 3 – QUANTIDADE DE ENERGIA PRIMÁRIA E EMISSÕES PARA TRANSPORTE

COD.	Serviço	Quantidade de Energia (kW/h)	Quantidade de Horas de Trabalho (h)			Quantidade de Energia (MJ)		
			Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
E401	Caminhão Carroceria - caminhão c/ caçamba termica	136	8.423	6.521	-	4.123.872	3.192.456	-
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	210	47.511	54.607	47.084	35.917.947	41.282.855	35.595.285
E427	Caminhão Betoneira - 11,5 t 5m3	205	-	-	3.696	-	-	2.727.443
Total			40.041.819			44.475.311	38.322.728	

COD.	Serviço	Emissões g/MJ									
		CO2					N2O				
		79					0,0016				
		Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B
E401	Caminhão Carroceria - caminhão c/ caçamba térmica	3,26E+08	2,52E+08	0,00E+00	6,60E+03	5,11E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E+02	1,60E+02
E404	Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t	2,84E+09	3,26E+09	2,81E+09	5,75E+04	6,61E+04	5,70E+04	5,70E+04	1,80E+03	2,06E+03	1,78E+03
E427	Caminhão Betoneira - 11,5 t 5m3	0,00E+00	0,00E+00	2,15E+08	0,00E+00	0,00E+00	4,36E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,36E+02
Total		3,16E+09	3,51E+09	3,03E+09	64,067	71,160	61,316	2,002	2,224	1,916	

TIPO A	QI (m/km)	IRI (m/km)	Leves				Pesados				CO ₂				S.O				CH ₄
			Aumento do Consumo LEVES(%)	FR (VDM Leves)	Iu (km/ano)	Qi (km/l)	C _{estimado} (l/ano)	C _{ajudicial} (l/ano)	FCF PESADOS	Aumento do Consumo PESADOS (%)	FR (VDM Pesados)	Iu (km/ano)	Qi (km/l)	C _{estimado} (l/ano)	C _{ajudicial} (l/ano)	Gasolina	Diesel	Gasolina	
1	-	-	1,000	6,506	-	-	1,000	0,00%	1,851	100,000	6	36,780,302	0	108,825,6	2,3	2,7			
2	25	1,92	1,007	6,674	10,000	10	6,673,855	47962	0,995	2,045	100,000	6	36,780,302	0	108,825,6	-	-		
3	26	2,00	1,008	6,846	10,000	10	6,846,040	53084	0,996	2,259	100,000	6	40,534,878	0	120,448,0	-	2,4	-	0,1
4	27	2,08	1,008	7,023	10,000	10	7,022,668	58439	0,998	2,496	100,000	6	44,893,413	0	132,597,8	-	2,7	-	0,1
5	26	2,00	1,008	7,204	10,000	10	7,203,853	55859	0,996	2,758	100,000	6	49,598,243	0	126,743,3	-	2,6	-	0,1
6	27	2,08	1,008	7,389	10,000	10	7,389,000	61487	0,998	3,047	100,000	6	54,796,139	0	139,514,6	-	2,8	-	0,1
7	27	2,08	1,008	7,568	10,000	10	7,568,035	62977	0,998	3,185	100,000	6	57,289,363	0	142,895,1	-	2,9	-	0,1
8	28	2,15	1,009	7,751	10,000	10	7,751,409	68902	1,000	3,330	100,000	6	59,896,029	0	156,337,9	-	3,2	-	0,1
9	28	2,15	1,009	7,939	10,000	10	7,939,226	70571	1,000	3,482	100,000	6	62,821,298	0	160,126,0	-	3,2	-	0,1
10	27	2,08	1,008	8,132	10,000	10	8,131,593	67667	0,998	3,640	100,000	6	65,470,567	0	153,535,8	-	3,1	-	0,1
11	28	2,15	1,009	8,328	10,000	10	8,328,000	74027	1,000	3,806	100,000	6	68,449,478	0	167,967,2	-	3,4	-	0,1
12	28	2,15	1,009	8,470	10,000	10	8,470,326	75292	1,000	4,002	100,000	6	71,984,209	0	170,837,7	-	3,5	-	0,1
13	29	2,23	1,009	8,615	10,000	10	8,615,083	81468	1,001	4,209	100,000	6	75,701,474	94743	184,849,9	253,059,4	3,7	5,1	0,1
14	28	2,15	1,009	8,859	10,000	10	8,762,315	77888	1,000	4,426	100,000	6	79,510,698	0	176,726,8	-	3,6	-	0,1
15	28	2,15	1,009	8,912	10,000	10	8,912,063	79219	1,000	4,655	100,000	6	83,721,794	0	179,747,1	-	3,6	-	0,1
16	29	2,23	1,009	9,064	10,000	10	9,064,000	85713	1,001	4,895	100,000	6	88,045,188	110192	194,482,0	294,322,7	3,9	6,0	0,1
17	28	2,15	1,009	9,219	10,000	10	9,219,448	81951	1,000	5,032	100,000	6	90,305,170	0	185,946,7	-	3,8	-	0,1
18	28	2,15	1,009	9,378	10,000	10	9,377,561	83356	1,000	5,173	100,000	6	93,033,885	0	189,135,7	-	3,8	-	0,1
19	29	2,23	1,009	9,538	10,000	10	9,538,386	90199	1,001	5,317	100,000	6	95,033,251	119689	204,660,7	319,688,5	4,1	6,5	0,1
20	28	2,15	1,009	9,805	10,000	10	9,804,889	87155	1,000	5,466	100,000	6	98,305,244	0	197,754,5	-	4,0	-	0,1

TIPO B	QI (m/km)	IRI (m/km)	Aumento do		FR (VDM Leves)	lu (km/ano)	QI (km/l)	C _{estimado} (l/ano)	C _{adicional} (l/ano)	Aumento do		FR (VDM Pesados)	lu (km/ano)	QI (km/l)	C _{estimado} (l/ano)	C _{adicional} (l/ano)	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
			Consumo LEVES(%)	FCF LEVES						Consumo PESADOS (%)	FCF PESADOS									
1	-	-	1,000		6,506					1,000		1,851					0,0	0,0		
2	23	1,77	1,006	0,61%	6,674	10,000	10	6,673,855	40388	0,991	0,00%	2,045	100,000	6	36,780,302	0	91,639,5	-	-	-
3	23	1,77	1,006	0,61%	6,846	10,000	10	6,846,040	41430	0,991	0,00%	2,259	100,000	6	40,634,878	0	94,003,8	-	1,9	0,1
4	24	1,85	1,007	0,66%	7,023	10,000	10	7,022,668	46484	0,993	0,00%	2,496	100,000	6	44,893,413	0	105,471,2	-	2,1	0,1
5	24	1,85	1,007	0,66%	7,204	10,000	10	7,203,853	47683	0,993	0,00%	2,758	100,000	6	49,598,243	0	108,192,4	-	2,2	0,1
6	24	1,85	1,007	0,66%	7,389	10,000	10	7,389,000	48908	0,993	0,00%	3,047	100,000	6	54,796,139	0	110,973,1	-	2,2	0,1
7	25	1,92	1,007	0,72%	7,568	10,000	10	7,568,035	54388	0,995	0,00%	3,185	100,000	6	57,289,363	0	123,406,3	-	2,5	0,1
8	25	1,92	1,007	0,72%	7,751	10,000	10	7,751,409	55706	0,995	0,00%	3,330	100,000	6	59,896,029	0	126,396,5	-	2,6	0,1
9	26	2,00	1,008	0,78%	7,939	10,000	10	7,939,226	61561	0,996	0,00%	3,482	100,000	6	62,621,298	0	139,681,4	-	2,8	0,1
10	24	1,85	1,007	0,66%	8,132	10,000	10	8,131,593	53824	0,993	0,00%	3,640	100,000	6	65,470,567	0	122,125,8	-	2,5	0,1
11	25	1,92	1,007	0,72%	8,328	10,000	10	8,328,000	59849	0,995	0,00%	3,806	100,000	6	68,449,478	0	135,798,5	-	2,8	0,1
12	25	1,92	1,007	0,72%	8,470	10,000	10	8,470,326	60872	0,995	0,00%	4,002	100,000	6	71,984,209	0	138,119,3	-	2,8	0,1
13	26	2,00	1,008	0,78%	8,615	10,000	10	8,615,083	66801	0,996	0,00%	4,209	100,000	6	75,701,474	0	151,572,3	-	3,1	0,1
14	26	2,00	1,008	0,78%	8,762	10,000	10	8,762,315	67943	0,996	0,00%	4,426	100,000	6	79,610,698	0	154,162,6	-	3,1	0,1
15	25	1,92	1,007	0,72%	8,912	10,000	10	8,912,063	64047	0,995	0,00%	4,655	100,000	6	83,721,794	0	145,322,4	-	2,9	0,1
16	25	1,92	1,007	0,72%	9,064	10,000	10	9,064,000	65139	0,995	0,00%	4,895	100,000	6	88,045,188	0	147,799,9	-	3,0	0,1
17	26	2,00	1,008	0,78%	9,219	10,000	10	9,219,448	71488	0,996	0,00%	5,032	100,000	6	90,505,170	0	162,205,4	-	3,3	0,1
18	26	2,00	1,008	0,78%	9,378	10,000	10	9,377,561	72714	0,996	0,00%	5,173	100,000	6	93,033,885	0	164,987,2	-	3,3	0,1
19	27	2,08	1,008	0,83%	9,538	10,000	10	9,538,386	79373	0,998	0,00%	5,317	100,000	6	95,633,251	0	180,098,1	-	3,6	0,1
20	25	1,92	1,007	0,72%	9,805	10,000	10	9,804,889	70463	0,995	0,00%	5,466	100,000	6	98,305,244	0	159,881,0	-	3,2	0,1

ANEXO H – DADOS DE SAÍDA OBTIDOS DO SIMAPRO

Atividade	Por unidade	Material/Recursos de Energia (MJ)	Gás Natural (MJ)	Óleo (MJ)	Carvão (MJ)	Combustível de Biomassa (MJ)	Peat (MJ)	Urânio (MJ)	Energia elétrica (MJ)	Volume (g)	co2 (g)	n2o (g)	ch4 (g)	partículas (g)	BOD (g)	COD (g)	Energia (MJ)
Produção de Betume	plon de betume	414	1782,347	1055,46	10,08	11,34	1,134	403	118,4	1000000	72698	0,1058	0,0353	8,02624	19	344,0216	3,796
Extração do Betume	plon de betume		1780								99.600						
Produção do betume refino do betume	plon de betume			573						1000000	37.000			8,00	19	344	
Transporte	plon de betume			287							22.200						
Transporte alternativo	plon de betume			159,5							11.100						
Energia elétrica	plon de betume	162		19,8							616	0,068	0,023	0,01			
Produção de energia para refino	plon de betume	90	0,837	5,76	3,6	4,05	0,405	144	42,3		1.440			0,01		0	
Produção de energia para transporte	plon de betume	162	1,51	10,4	6,48	7,29	0,729	259	76,1		342	0,038	0,013	0,01			
Aplicação da Emulsão	m²	0,0207	0,0891	0,05686	0,000504	0,000567	0,000567	0,0202	0,00592	50	9	0,000	0,000	0,00	0	0	50
Betume	m²	0,0207	0,0891	0,0528	0,000504	0,000567	0,000567	0,0202	0,00592	50	9	0,000	0,000	0,00	0	0	50
Equipamento	m²			0,00406							0	0,000	0,000	0,00	0	0	0
Produção dos Agregados	plon de agregados	21,2	0,197	20,06	0,848	0,954	0,0954	33,9	9,96	0	1,421	0,004	0,036	0,49	0	0	87
Operação dos Equipamentos e Transporte	plon de agregados			18,7							1.340	0,001	0,027	0,48		0	
Energia para produção dos agregados	plon de agregados	21,2	0,197	1,36	0,848	0,954	0,0954	33,9	9,96	0	81	0,003	0,009	0,00			
Extração de agregados e areia	plon de material agr	2,4	0,0223	1,041	0,0959	0,108	0,0108	3,84	1,13	0	73	0,000	0,002	0,02	0	0	9
Operação de escavação Equipamento	plon de material agr			0,888							64	0,000	0,001	0,02		0	
Energia para produção	plon de material agr	2,4	0,0223	0,153	0,0959	0,108	0,0108	3,84	1,13	0	9	0,000	0,001	0,00			
Produção do Cimento	kg cimento	0,39	0,00363	0,0656	3,8756	0,0176	0,00176	0,624	0,183	0	806	0,000	0,000	0,00	0	0	5
Produção do Cimento	kg cimento	0,39		0,0406	3,86						805						4
Energia Elétrica para a produção	kg cimento		0,00363	0,025	0,0156	0,0176	0,00176	0,624	0,183	0	1	0,000	0,000	0,00			1
Produção do Concreto	m³ de concreto	199,78	1,8566	105,599	1551,7561	8,9875	0,89875	320,19	93,949	0	328,675	0,19533	0,031503	401,98937	0	0,083578	2283
Cimento	m³ de concreto	156	1,45	26,2	1550	7,02	0,702	250	73,3		323.000	0,066	0,022	400,00			2065
Agregados	m³ de concreto	25,4	0,236	24,1	1,02	1,14	0,114	40,7	12		1.710	0,043	0,005	0,58		0	105
Areia	m³ de concreto	1,68	0,0156	0,729	0,0671	0,0755	0,00755	2,69	0,789		51	0,002	0,000	0,02		0	6
Diesel para equipamentos	m³ de concreto			53,5							3.650	0,078	0,002	1,39		0	54
Eleticidade para a produção de concreto	m³ de concreto	16,7	0,155	1,07	0,669	0,752	0,0752	25,8	7,86		64	0,007	0,002	0,00			54
Limpeza do terreno	m3	0	0	44,4	0	0	0	0	0	0	3,190	0,065	0,002	1,15	0	0	44
Equipamento	m3			18,5							1.330	0,027	0,001	0,48		0	
Transporte	m3			25,9							1.860	0,038	0,001	0,67		0	

Atividade	Por unidade	Material/Recursos de Energia (MJ)	Gás Natural (MJ)	Óleo (MJ)	Carvão (MJ)	Combustível de Biomassa (MJ)	Peat (MJ)	Uránio (MJ)	Energia elétrica (MJ)	Betume (g)	co2 (g)	n2o (g)	ch4 (g)	partículas (g)	BOD (g)	COD (g)	Energia (MJ)
Produção de Mistura Asfáltica	ton de asfalto	80,7	107,52	369,4	2,842	3,196	0,3196	113,7	33,37	0	34,377	0,05535	0,01075	3,79452	1,14	20,7192	711
Produção do betume	ton de asfalto	24,8	107	63,3	0,605	0,68	0,068	24,2	7,11		10,400	0,006	0,002	0,49	1	21	228
Produção dos Agregados	ton de asfalto	19,9	0,185	18,8	0,797	0,896	0,0896	31,9	9,36		1,340	0,034	0,004	0,46		0	82
Energia Elétrica Usina de Asfalto	ton de asfalto	36	0,335	2,3	1,44	1,62	0,162	57,6	16,9		137	0,015	0,005	0,00			116
Combustível para Usina de Asfalto	ton de asfalto			285							22,500			2,85			285
Produção de Polietileno Plástico	kg	7,89	45,1	35,8	2,76						1,100			2,00	15	1	92
Produção de Aço Galvanizado	kg	4,7	1,8	3,61	15,2						2210	0,0305	9,12	39		0,00937	25
Aço	kg	4,62	1,77	3,58	15,2						2190	0,0289	9,05	39		0,00925	25
Zinco	kg	0,0805	0,03	0,03	0						20	0,0006	0,07			0,00012	0
Serragem e selagem de juntas em Pav de Concreto	m2 de pav de conc.	0	0	0,543	0	0	0	0	0	0	39	0,000247	0,00079	0,0141	0	0,000593	1
Equipamento	m2 de pav de conc.			0,543							39	0,000247	0,00079	0,0141		0,000593	1

ANEXO I – AICV – ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Módulo/Etapa	Emissões (t)											
	Energia Primária Consumida (TJ)						CO2			N2O		
							79			0,0016		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo A	Tipo B	Tipo C
1 Matérias Primas	383	333	123	1.981	3.708	13.751	1,50E-03	1,68E-03	1,08E-02	1,02E-02	8,68E-03	2,13E+00
2 Construção	10	11	5	777	893	384	1,57E-02	1,81E-02	7,77E-03	4,92E-04	5,65E-04	2,43E-04
3 Transporte	40	44	38	3.163	3.514	3.027	6,41E-02	7,12E-02	6,13E-02	2,00E-03	2,22E-03	1,92E-03
4 Congestionamento e Atrasos do usuários												
5 Operações e Uso				4	3	13	7,80E-05	5,00E-05	2,65E-04	2,44E-06	1,56E-06	8,29E-06
Total por Tipo de Pavimento	433	388	167	5.926	8.118	17.175	0,08	0,09	0,08	0,01	0,01	2,14

ANEXO J – LCCA – CÁLCULO DOS CUSTOS AOS USUÁRIOS

CUSTOS DOS USUÁRIOS

	1	2	3	4
Pavimento	Custo adicional devido aos trabalhos de conservação	Consumo Adicional devido ao aumento do IRI	Custo do tempo dos usuários devido as restaurações na via	Custo do risco de acidentes R\$
Tipo A	R\$ -	R\$ 6.054.830,23	R\$ 315.152,96	22626548,4
Tipo B	R\$ -	R\$ 4.206.876,57	R\$ 226.910,13	16291114,85
Tipo C	R\$ -	R\$ 16.693.868,59	R\$ 171.233,11	12293757,97

Preço do Combustível R\$	Data Base
Gasolina R\$ 3,73	30/05/2016
Diesel R\$ 3,01	30/05/2016

Consumo Adicional devido ao aumento do IRI

Pavimento	C _{adicional} (I)	Veículos		Valor Total
		Passeio	Comerciais	
Tipo A	1.687.838	R\$ 5.079.335	R\$ 975.495	R\$ 6.054.830
Tipo B	1.129.060	R\$ 4.206.877	R\$ -	R\$ 4.206.877
Tipo C	5.184.639	R\$ 5.757.103	R\$ 10.936.766	R\$ 16.693.869

Valor da Hora dos Usuários para o Estado de São Paulo

RSM	renda média dos habit	R\$ 1.432,00
ES	são os encargos socia	1,95
FA	possibilidade de uso a	0,30
HP	percentual de uso proc	0,50
NH	o número de horas de	168,00
CT		R\$ 2,49
Leves		
IU	Nível de Utilização (kn	10.000
média mensal	km/dia	27,40
tempo p/ dia sem manutenção		0,27
tempo p/ dia com manutenção		0,42
Aumento de tempo (h/dia)		0,15

Pesados	
	100.000
	273,97
	2,74
	4,21
	1,48

Custo do tempo dos usuários devido as intervenções na via

Leves

Pavimento	Período (dias)	Atrasos (h/dia)	Atrasos/ horas 20 anos	VDM médio total	Valor Total
Tipo A	300	0,15	44	510	56.254
Tipo B	216		32		40.503
Tipo C	163		24		30.565

Pesados

Pavimento	Período (dias)	Atrasos (h/dia)	Atrasos/ horas 20 anos	VDM médio total	Valor Total
Tipo A	300	1,48	443	235	258.899
Tipo B	216		319		186.407
Tipo C	163		240		140.668

Custo do risco de acidentes						4
Pavimento	Período (dias)	Distâncias Percorridas por dia		VDM		Valor Total
		Passeio	Comerciais	Passeio	Comerciais	
Tipo A	300					R\$ 22.626.548
Tipo B	216	27	274	1.020	469	R\$ 16.291.115
Tipo C	163					R\$ 12.293.758
Dolar 05/06	3,525					8.379.644,70
Milha	1,609 km					
Dolar/milha	0,13 VMT					
Dolar/milha	0,09 VMT					
Dolar/km	0,081 Reais/km	R\$	0,28			
Dolar/km	0,056 Reais/km	R\$	0,20			

ANEXO K – LCCA – CÁLCULO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO

Pavimento Tipo A		Taxa de Atualização	Fator do Valor Atual	SV - Valor Residual (R\$)		VPL (R\$)	
		10%	0,15	R\$	314.258	R\$	36.403.490
Estimativa de Custos (R\$)							
Ano	Adm. Rodoviária		Aos Usuários			Total	
	Construção Inicial	Conservação	Tempo de Atraso	Devido aos Aumento do IRI	Risco de Acidentes		
0							
1	R\$ 24.294.446,39						R\$ 24.294.446,39
2		R\$ 9.536,28		R\$ 197.791,71			R\$ 207.328,00
3		R\$ 18.275,83		R\$ 217.743,20			R\$ 236.019,03
4		R\$ 27.015,38		R\$ 208.129,43			R\$ 235.144,80
5		R\$ 1.901.164,23	R\$ 63.030,59	R\$ 229.101,60	R\$ 4.525.309,68		R\$ 6.718.606,11
6		R\$ 46.087,94		R\$ 234.652,73			R\$ 280.740,68
7		R\$ 92.175,89		R\$ 256.727,65			R\$ 348.903,54
8		R\$ 138.263,83		R\$ 262.948,16			R\$ 401.212,00
9		R\$ 184.351,78		R\$ 252.126,27			R\$ 436.478,04
10		R\$ 2.095.052,29	R\$ 63.030,59	R\$ 275.824,42	R\$ 4.525.309,68		R\$ 6.959.216,98
11		R\$ 230.439,72		R\$ 280.538,26			R\$ 510.977,98
12		R\$ 230.439,72		R\$ 588.251,70			R\$ 818.691,42
13		R\$ 230.439,72		R\$ 290.208,99			R\$ 520.648,71
14		R\$ 2.095.052,29	R\$ 63.030,59	R\$ 295.168,67	R\$ 4.525.309,68		R\$ 6.978.561,23
15		R\$ 230.439,72		R\$ 650.492,18			R\$ 880.931,90
16		R\$ 230.439,72		R\$ 305.349,28			R\$ 535.789,00
17		R\$ 2.095.052,29	R\$ 63.030,59	R\$ 310.586,02	R\$ 4.525.309,68		R\$ 6.993.978,58
18		R\$ 230.439,72		R\$ 695.744,69			R\$ 926.184,41
19		R\$ 230.439,72		R\$ 324.739,17			R\$ 555.178,89
20		R\$ 2.095.052,29	R\$ 63.030,59	R\$ 6.054.830,23	R\$ 4.525.309,68		R\$ 12.738.222,79
Total	R\$ 24.294.446,39	R\$ 12.410.158,36	R\$ 315.152,96	R\$ 11.930.954,37	R\$ 22.626.548,40		R\$ 71.577.260,48

Pavimento Tipo B		Taxa de Atualização	Fator do Valor Atual	SV - Valor Residual (R\$)		VPL (R\$)	
		10%	0,15		523.763		31.543.260
Estimativa de Custos (R\$)							
Ano	Adm. Rodoviária		Aos Usuários			Total	
	Construção Inicial	Conservação	Tempo de Atraso	Devido aos Aumento do IRI	Risco de Acidentes		
0							
1	R\$ 22.213.330,28						R\$ 22.213.330,28
2		R\$ 9.536,28		R\$ 154.366,70			R\$ 163.902,98
3		R\$ 18.275,83		R\$ 173.197,82			R\$ 191.473,65
4		R\$ 27.015,38		R\$ 177.666,32			R\$ 204.681,70
5		R\$ 1.901.164,23	R\$ 56.727,53	R\$ 182.232,55	R\$ 4.072.778,71		R\$ 6.212.903,02
6		R\$ 46.087,94		R\$ 202.649,61			R\$ 248.737,55
7		R\$ 92.175,89		R\$ 207.559,81			R\$ 299.735,69
8		R\$ 138.263,83		R\$ 229.375,37			R\$ 367.639,21
9		R\$ 184.351,78		R\$ 200.546,88			R\$ 384.898,66
10		R\$ 2.095.052,29	R\$ 56.727,53	R\$ 222.999,21	R\$ 4.072.778,71		R\$ 6.447.557,74
11		R\$ 230.439,72		R\$ 226.810,26			R\$ 457.249,98
12		R\$ 230.439,72		R\$ 248.901,85			R\$ 479.341,57
13		R\$ 230.439,72		R\$ 253.155,59			R\$ 483.595,31
14		R\$ 230.439,72		R\$ 238.638,69			R\$ 469.078,41
15		R\$ 2.095.052,29	R\$ 56.727,53	R\$ 242.707,11	R\$ 4.072.778,71		R\$ 6.467.265,65
16		R\$ 230.439,72		R\$ 266.362,79			R\$ 496.802,50
17		R\$ 230.439,72		R\$ 270.930,91			R\$ 501.370,63
18		R\$ 230.439,72		R\$ 295.744,97			R\$ 526.184,69
19		R\$ 230.439,72		R\$ 262.545,92			R\$ 492.985,64
20		R\$ 2.095.052,29	R\$ 56.727,53	R\$ 4.056.392,36	R\$ 4.072.778,71		R\$ 10.280.950,90
Total	R\$ 22.213.330,28	R\$ 10.545.545,79	R\$ 226.910,13	R\$ 8.112.784,72	R\$ 16.291.114,85		R\$ 57.389.685,78

Pavimento Tipo C		Taxa de Atualização	Fator do Valor Atual	SV - Valor Residual (R\$)	VPL (R\$)
		10%	0,15	510.324	35.776.913
Estimativa de Custos (R\$)					
Ano	Adm. Rodoviária			Aos Usuários	
	Construção Inicial	Conservação	Tempo de Atraso	Devido aos Aumento do IRI	Risco de Acidentes
0					
1	R\$ 25.846.420,15				R\$ 25.846.420,15
2		R\$ 1.133,57		R\$ 228.464,25	R\$ 229.597,82
3		R\$ 2.267,14		R\$ 407.321,21	R\$ 409.588,35
4		R\$ 3.400,70		R\$ 659.206,71	R\$ 662.607,41
5		R\$ 4.534,27		R\$ 966.384,60	R\$ 970.918,87
6		R\$ 5.667,84		R\$ 1.283.030,72	R\$ 1.288.698,56
7		R\$ 5.667,84		R\$ 1.634.728,23	R\$ 1.640.396,07
8		R\$ 5.667,84		R\$ 2.024.648,08	R\$ 2.030.315,92
9		R\$ 5.667,84		R\$ 257.284,21	R\$ 262.952,05
10		R\$ 45.342,72	R\$ 57.077,70	R\$ 277.919,82	R\$ 4.097.919,32
11		R\$ 5.667,84		R\$ 555.029,26	R\$ 560.697,10
12		R\$ 5.667,84		R\$ 918.096,74	R\$ 923.764,58
13		R\$ 5.667,84		R\$ 1.327.301,96	R\$ 1.332.969,80
14		R\$ 5.667,84		R\$ 281.978,34	R\$ 287.646,18
15		R\$ 332.304,62	R\$ 57.077,70	R\$ 302.481,42	R\$ 4.097.919,32
16		R\$ 5.667,84		R\$ 647.553,79	R\$ 653.221,63
17		R\$ 5.667,84		R\$ 1.083.540,53	R\$ 1.089.208,37
18		R\$ 5.667,84		R\$ 1.556.040,03	R\$ 1.561.707,87
19		R\$ 5.667,84		R\$ 2.071.697,43	R\$ 2.077.365,27
20		R\$ 2.041.295,34	R\$ 57.077,70	R\$ 16.482.707,33	R\$ 4.097.919,32
Total	R\$ 25.846.420,15	R\$ 2.498.292,44	R\$ 171.233,11	R\$ 32.965.414,65	R\$ 12.293.757,97
					R\$ 73.775.118,31

ANEXO L – INTEGRAÇÃO – AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO AHP

Matriz de Prioridades

ordem	Aspectos	VPL	GEE	Construção inicial	Custos aos Usuários
4	Custos aos Usuários	9	5	3	1
3	Construção inicial	5	3	1	0,33
2	GEE	3	1	0,33	0,20
1	VPL	1	0,33	0,20	0,11
	Σ	18,00	9,33	4,53	1,64

4	Custos aos Usuários	0,056	0,036	0,044	0,068
3	Construção inicial	0,167	0,107	0,074	0,122
2	GEE	0,278	0,321	0,221	0,203
1	VPL	0,500	0,536	0,662	0,608
	Σ	1,00	1,00	1,00	1,00

Aspectos	Pesos	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Custos aos Usuários	0,0507	1.471.248	1.051.556	1.479.484
Construção inicial	0,1172	2.848.284	2.604.294	3.030.238
GEE	0,2556	1.521	2.082	4.409
VPL	0,5764	20.982.854	18.181.433	20.621.697