UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JÚLIA PANZARIN SAVIETTO

**Análise de Impactos Ambientais da Restauração de
Pavimentos Asfálticos pela Avaliação do Ciclo de Vida**

São Carlos

2017

JÚLIA PANZARIN SAVIETTO

**Análise de Impactos Ambientais da Restauração de um
Pavimento Asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Infraestrutura de transportes.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Paula Furlan

Versão Corrigida

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S263a Savietto, Júlia Panzarin
Análise de Impactos Ambientais da Restauração de
Pavimento Asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida /
Júlia Panzarin Savietto; orientadora Ana Paula Furlan.
São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infraestrutura de Transportes -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 2. Impacto
Ambiental. 3. Pavimentação. 4. Pavimento asfáltico. 5.
Restauração. 6. EDIP. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: **JÚLIA PANZARIN SAVIETTO**

Título da dissertação: "Análise de impactos ambientais da restauração de um pavimento asfáltico pela avaliação do ciclo de vida"

Data da defesa: 07/07/2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profª. Drª. **Ana Paula Furlan**
(**Orientadora**)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Associado **Aldo Roberto Ometto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Caio Rubens Gonçalves Santos**
(Instituto Mauá de Tecnologia/IMT)

Aprovada

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:

Profª. Associada **Ana Paula Camargo Larocca**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Ana Paula Furlan, por ter aceitado o desafio de me orientar em um tema novo para ela, com esta pesquisa pude crescer muito cientificamente e intelectualmente.

Ao Professor Associado Aldo Roberto Ometto, por ser um elemento chave para o desenvolvimento desta dissertação, por ter participado na minha qualificação e por ter ministrado a disciplina "Engenharia do Ciclo de Vida", tão importante para meu conhecimento de ACV e Economia Circular.

A todos os funcionários e docentes do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC/USP. Agradecimentos especiais ao Professor Doutor Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela orientação no programa PAE e por tentar me ajudar na busca do tema da dissertação, no começo do meu mestrado; ao Professor Titular José Leomar Fernandes Júnior, pela contribuição na minha qualificação e por se dispor a ajudar quando eu precisasse; e, por fim, à funcionária Benê, por sua simpatia e seu café que ajudou em minhas tardes no departamento.

A todos meus familiares, amigos, e colegas do departamento, algumas vezes por ajudarem na minha pesquisa e darem algumas sugestões valiosas, outras por passarem palavras de incentivo ou simplesmente por estarem por perto e me ajudarem a descontraír nos momentos de estresse.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

SAVIETTO, J. P. **Análise de Impactos Ambientais da Restauração de um Pavimento Asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A infraestrutura de transportes traz benefícios sociais e econômicos, porém traz também inevitáveis impactos ambientais que não podem ser negligenciados, como supressão da vegetação local e poluição atmosférica. Esses impactos ambientais podem ser quantificados e analisados pela técnica Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que cria a possibilidade de contemplar o aspecto ambiental na tomada de decisões e pode trazer melhor compreensão da cadeia produtiva. Na última década, é crescente a utilização dessa técnica na área de pavimentação, entretanto ainda é pouco usual no Brasil. O objetivo dessa dissertação é avaliar os impactos ambientais produzidos por duas técnicas de restauração de pavimentos asfálticos, comparando-se os resultados de ACV que observaram as fases de produção de materiais e de transportes. Dois cenários de restauração foram estudados, o primeiro considerou uma mistura asfáltica composta exclusivamente por materiais virgens (restauração convencional), e o segundo, considerou uma mistura asfáltica composta por 35% de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA). As ACV foram procedidas de três maneiras distintas: (a) com o banco de dados e software alemão *GaBi* e o método EDIP 1997, (b) com o banco de dados da *USLCI* e pelo método do EDIP 1997, e (c) com software *PavementLCA* e o método TRACI. Os resultados obtidos a partir dos três diferentes procedimentos indicaram que a restauração com RPA apresentou redução dos impactos ambientais potenciais quando comparada com a restauração convencional. Observou-se também que, para a maioria das análises, a atividade que mais contribuiu para os impactos das duas estratégias de restauração foi a de produção dos materiais. A análise de sensibilidade dos resultados obtidos com o *GaBi* e com o *USLCI* mostrou diferenças consideráveis, causadas pelas diferentes fontes de dados. Apesar de ser uma técnica em crescimento, a ACV ainda apresenta limitações quando aplicada a pavimentos, sobretudo, pela complexidade de seu ciclo de vida e pelas incertezas que envolvem sua elaboração, assim, estudos sobre ACV devem continuar, a fim de padronizar a técnica para a área e, com o tempo, obter resultados cada vez mais precisos.

Palavras chave: Impactos ambientais. Pavimento asfáltico. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA). EDIP.

ABSTRACT

SAVIETTO, J. P. **Environmental Impact Analysis of Asphalt Pavements Rehabilitation by Life Cycle Assessment**. 2017. Thesis (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Transportation infrastructure brings social and economic benefits, but it also brings unavoidable environmental impacts that can not be neglected, such as suppression of local vegetation and air pollution. These environmental impacts can be quantified and analyzed by the Life Cycle Assessment (LCA) technique, which creates the possibility of contemplating the environmental aspect in decision making and can provide a better understanding of the production chain. In the last decade, the use of this technique in the area of pavement is increasing, although not very usual in Brazil. The goal of this thesis is to analyze the environmental impacts produced by two asphalt pavement rehabilitation techniques, comparing the LCA results of material production and transportation phases. Two rehabilitation scenarios were studied, the first one considering an asphalt mixture composed exclusively by raw materials (conventional rehabilitation), and the second one considered an asphalt mixture composed by 35% of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The LCA was done in three different ways: (a) with the German database and software *GaBi* and the EDIP 1997 method, (b) with the *USLCI* database and the EDIP 1997 method, and (c) with *PavementLCA* software and the TRACI method. The results obtained from the three different procedures indicated that the rehabilitation with RPA showed reduction of the potential environmental impacts when compared with the conventional rehabilitation. It was also observed that for the majority of the analysis, the activity that contributed the most to the impacts of the two rehabilitation strategies was the material production one. The sensitivity analysis of the results obtained with *GaBi* and with *USLCI* showed considerable differences in their values, caused by the different data sources. Although it is a growing technique, LCA still presents limitations when applied to pavements, mainly due to the complexity of its life cycle and the uncertainties involved in its elaboration, so studies about LCA should continue with the aim of standardizing the technique for the area and, over time, achieve increasingly more accurate results.

Keywords: Environmental impacts. Asphalt pavement. Life Cycle Assessment (LCA). Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). EDIP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas típicas para (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível (BERNUCCI et al., 2008)	25
Figura 2 - Evolução a condição do pavimento (Adaptado de KANDHAL; MALLICK, 1997).....	26
Figura 3 - Rolo de corte contido em máquinas fresadoras (BERNUCCI et al., 2006)	27
Figura 4 - Esquema de equipamento de reciclagem a quente no local através do equipamento da Wirtgen (DNIT, 2006)	30
Figura 5 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (Adaptado de ABNT, 2009a).....	33
Figura 6 - Exemplo de sistema e de fronteira de um sistema de ACV (ABNT, 2009a).	35
Figura 7 - Efeito do método de alocação nos resultados de impacto ambiental (CHEN et al., 2010).....	38
Figura 8 - Exemplo de classificação e caracterização para obtenção de valores de AICV (PE INTERNATIONAL, 2013)	43
Figura 9 - Impacto ambiental potencial de aquecimento global (PE INTERNATIONAL, 2013).....	44
Figura 10 - Impacto ambiental potencial de acidificação (PE INTERNATIONAL, 2013)....	45
Figura 11 – Impacto ambiental potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico (PE INTERNATIONAL, 2013)	46
Figura 12 - Exemplo de avaliação de consumo de energia total (WEILAND; MUENCH, 2010).....	49
Figura 13 – Fases do ciclo de vida típico de pavimentos e seus componentes (SANTERO; MASANET; HORVATH, 2011a)	51
Figura 14 - Quantidade de artigos publicados sobre o tema disponíveis no dia 30/06/2016 ..	55
Figura 15 - Sistemas dos dois cenários sugeridos, sendo (a) cenário convencional, e (b) cenário com reciclagem	59
Figura 16 – Impacto potencial de acidificação, em kg SO ₂ eq., com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	76
Figura 17 - Impacto potencial de ecotoxicidade, em m ³ de solo, com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	77
Figura 18 - Impacto potencial de aquecimento global, em kg CO ₂ eq., com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	78
Figura 19 - Impacto potencial de toxicidade humana do ar, em m ³ de ar, com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	80
Figura 20 - Impacto potencial de toxicidade humana do solo, em m ³ de solo, com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	80
Figura 21 - Impacto potencial de toxicidade humana da água, em m ³ de água, com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	81

Figura 22 – Impacto potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico, em kg C ₂ H ₄ eq., com dados do <i>GaBi</i> e do <i>USLCI</i>	82
Figura 23 - Resultados de potencial de consumo de energia, em MJ, com dados do <i>GaBi</i> e com dados do <i>USLCI</i>	83
Figura 24 – Ganho ambiental dos aspectos ambientais da restauração com RPA.....	84
Figura 25 - Contribuição relativa dos resultados de impactos potenciais e energia com os dados coletados do software <i>GaBi</i> , onde (1) é referente ao cenário convencional, e (2) referente ao cenário com RPA	86
Figura 26 - Contribuição relativa dos resultados de impactos potenciais e energia com os dados coletados do <i>USLCI</i> , onde (1) é referente ao cenário convencional, e (2) referente ao cenário com RPA	86
Figura 27 - Comparação percentual dos impactos potenciais totais e consumo de energia total entre os cenários analisados	87
Figura 28 - Resultados obtidos pelo software <i>PavementLCA</i> de potencial de acidificação, em kg SO ₂ eq.	89
Figura 29 - Resultados obtidos pelo software <i>PavementLCA</i> de potencial de aquecimento global, em kg CO ₂ eq.	89
Figura 30 - Resultados obtidos pelo software <i>PavementLCA</i> de consumo de energia, em MJ	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reflexos ambientais das ações causadas pela infraestrutura de transportes.....	24
Tabela 2 - Exemplos de unidade funcional (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).	36
Tabela 3 - Exemplos de substâncias que contribuem para diferentes impactos ambientais (Adaptado de WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997)	41
Tabela 4 - Fatores de equivalência para o impacto de aquecimento global (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).....	42
Tabela 5 – Diferentes estratégias de manutenção e reabilitação de um pavimento para estudo de ACV comparativa (SANTOS et al., 2014)	52
Tabela 6 - Diferenças nos parâmetros da ACV de pavimentos entre estudos encontrados na literatura.....	53
Tabela 7 - Materiais necessários para o reforço estrutural	62
Tabela 8 - Equipamentos necessários para as duas soluções de reforço estrutural	62
Tabela 9 - Procedimentos necessários para o recapeamento	62
Tabela 10 - Massa específica de misturas asfálticas em relação ao teor de asfalto (BERNUCCI et al., 2008).....	63
Tabela 11 - Equipamentos necessários e suas especificações e seus consumos de diesel	64
Tabela 12 - Massa, em quilogramas, de materiais requeridos para a mistura asfáltica convencional e com RPA	67
Tabela 13 - Quantidade de equipamentos e diesel consumido para as atividades de transporte	67
Tabela 14 - Processos fornecidos pelo banco de dados <i>GaBi</i> utilizados para a ACV	68
Tabela 15 - Processos fornecidos pelo banco de dados <i>USLCI</i> utilizados para a ACV	69
Tabela 16 - Considerações tomadas para a utilização do programa <i>PavementLCA</i>	70
Tabela 17 – Impacto potenciais da AICV, em valores absolutos, utilizando os dados do <i>GaBi</i>	74
Tabela 18 - Valores absolutos encontrados na AICV utilizando os dados do <i>USLCI</i>	75
Tabela 19 – Impactos potenciais obtidos a partir do <i>PavementLCA</i>	88
Tabela 20 - Dados do <i>USLCI</i> de input do processo “ <i>Petroleum refining, at refinery</i> ”	101
Tabela 21 - Dados do <i>USLCI</i> de output do processo <i>Petroleum refining, at refinery</i>	102
Tabela 22 - Dados de input e output <i>USLCI</i> do processo “ <i>Transport, single unit truck, diesel powered</i> ”	103
Tabela 23 - Dados de input e output <i>USLCI</i> do processo “ <i>Limestone, at mine</i> ”	103
Tabela 24 - Cálculo de quantidade total de mistura asfáltica	104
Tabela 25 - Cálculo para teor de agente rejuvenescedor e de teor de asfalto adicional	104
Tabela 26 - Cálculos para consumo de diesel, na atividade de transporte para aterro	104

Tabela 27 - Cálculos para consumo de diesel, na atividade de transporte para local de restauração	105
Tabela 28 – Cálculos de AICV dos dados coletados da <i>USLCI</i> para o processo “ <i>Petroleum, at refinery</i> ” (continua).....	106
Tabela 29 - Cálculos de AICV dos dados coletados da <i>USLCI</i> para o processo “ <i>Transport, single unit truck, diesel powered</i> ”	108

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Potencial de acidificação
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AG	Potencial de aquecimento global
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EN	Potencial de consumo de energia
ET	Potencial de ecotoxicidade
FF	Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
RPA	Reciclado de Pavimento Asfáltico
TA	Potencial de toxicidade humana do ar
TG	Potencial de toxicidade humana da água
TS	Potencial de toxicidade humana do solo
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
<i>USLCI</i>	United States Life Cycle Inventory

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO.....	21
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES ..	23
2.1.1 <i>Restauração com reforço estrutural</i>	27
2.1.2 <i>Restauração com Reciclado de Pavimento Asfáltico</i>	29
2.2 PANORAMA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	31
2.3 DESENVOLVIMENTO DE UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	32
2.3.1 <i>Definição de objetivo e escopo</i>	33
2.3.2 <i>Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</i>	39
2.3.3 <i>Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)</i>	40
2.3.4 <i>Interpretação</i>	48
2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS	49
 3. METODOLOGIA	57
3.1 ESCOPO.....	58
3.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	66
3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	71

4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
4.1	IMPACTOS POTENCIAIS: DADOS DO <i>GaBi</i> e MÉTODO EDIP	73
4.2	IMPACTOS POTENCIAIS: DADOS DO <i>USLCI</i> e MÉTODO EDIP.....	74
4.3	IMPACTOS POTENCIAIS: COMPARAÇÃO ENTRE <i>GaBi</i> E <i>USLCI</i>	76
4.3.1	<i>Potencial de Acidificação</i>	76
4.3.2	<i>Potencial de ecotoxicidade</i>	77
4.3.3	<i>Potencial de aquecimento global</i>	78
4.3.4	<i>Potencial de toxicidade humana do ar</i>	79
4.3.5	<i>Potencial de toxicidade humana do solo</i>	80
4.3.6	<i>Potencial de toxicidade humana da água</i>	81
4.3.7	<i>Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico</i>	82
4.3.8	<i>Consumo de energia</i>	83
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	84
4.5	IMPACTOS POTENCIAIS: <i>PavementLCA</i>	88
5.	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO	101

1. INTRODUÇÃO

Os meios de transportes são ferramentas para o crescimento econômico de um país, e é por meio de sua infraestrutura que as pessoas se locomovem e têm acesso a outras necessidades, como saúde, lazer e educação. O transporte está intimamente ligado a diversas atividades humanas, sendo um meio que possibilita os deslocamentos necessários às pessoas e cargas.

Porém, sabe-se que os sistemas de transportes causam impactos negativos ao meio ambiente, tais como remoção da cobertura vegetal, poluição atmosférica e consumo de recursos naturais e de energia. Por isso, atualmente existe o reconhecimento da necessidade de considerar o fator ambiental para a tomada de decisões (FOGLIATTI; FILIPPO; GOUDARD, 2004). Neste aspecto, a escolha dos materiais utilizados na construção civil e de pavimentos se torna um campo importante para uma engenharia mais sustentável (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

Estudos de emissões causadas pela operação dos transportes já são comuns para a comunidade científica, e já são considerados como um possível foco de redução de impacto ambiental na área de transportes. Entretanto, o impacto ambiental vai muito além da fase de operação do sistema (SANTERO; MASANET; HORVATH, 2011a).

No passado o governo Brasileiro incentivou as rodovias como meio principal de transporte, isso trouxe uma série de impactos ambientais, tais como movimentação de terra, poluição atmosférica, desmatamento e alteração na drenagem local (PINTO, 2011). Além disso, na construção da estrutura de um pavimento são consumidos recursos naturais como materiais pétreos, ligantes asfálticos e hidráulicos, lançando posteriormente os efluentes e resíduos gerados sobre o meio ambiente (FOGLIATTI; FILIPPO; GOUDARD, 2004).

A construção de pavimentos asfálticos apresenta-se como um foco de impacto ambiental que deve ser considerado e analisado (FOGLIATTI; FILIPPO; GOUDARD, 2004). Como observado por Mroueh; Eskola e Laine-Ylijoki (MROUEH; LAINE-YLIJOKI; ESKOLA, 2001), a produção e o transporte de materiais utilizados nas construções de estradas produzem significativo impacto ambiental negativo, e as produções de ligantes asfálticos, cimento Portland e materiais pétreos estão relacionadas a altos consumos energéticos.

Nas últimas décadas, vem se estabelecendo o conceito de transporte sustentável, que é fundamentado na compensação do inevitável impacto negativo de suas ações. Esses impactos ambientais devem ser identificados e estudados para que ações preventivas ou de remediação sejam possíveis. Este tipo de estudo pode ser realizado empregando-se a técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerada uma técnica eficiente para compreender e lidar com os impactos causados pela fabricação de produtos. Ela pode melhorar o desempenho ambiental de produtos e serviços em um ou mais pontos de seu ciclo de vida (ABNT, 2009a).

Em alguns países, a ACV tem sido utilizada como instrumento de gerenciamento que analisa a construção e a manutenção de pavimentos. Exemplos de países que iniciaram esse tipo de pesquisa são Suíça, Inglaterra, França, Estados Unidos e Portugal. Como exemplo de pesquisas realizadas nesses países cita-se, respectivamente: Strippel (2001), Huang (2007), Ventura e Jullien (2009), Weiland e Muench, (2010) e Araújo (2014). Entretanto, no Brasil, o uso da ACV na área de pavimentação ainda é incipiente.

Essa pesquisa se insere num contexto de análise e comparação dos impactos ambientais causados por dois processos de restauração de pavimento asfáltico, a partir da utilização da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Além disso, ela também propõe fomentar a discussão sobre soluções para a redução e a remediação dos impactos ambientais causados na indústria da pavimentação.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivos:

1. Utilizar a técnica Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificar e comparar impactos potenciais de duas estratégias de restauração de pavimento asfáltico diferentes, sendo eles a restauração convencional (que utiliza apenas matérias primas virgens) e restauração com 35% de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RPA);

Esta ACV foi realizada para a realidade brasileira e serve como apoio à investigação sobre qual tipo de restauração de pavimento asfáltico é preferível em termos de impactos ambientais, analisando, em longo prazo, se a utilização de RPA na restauração do pavimento é uma alternativa mais sustentável quando comparada à uma convencional.

2. Realizar ACVs com diferentes fontes de dados e comparar os resultados obtidos, analisando a sensibilidade do estudo, ou seja, se essas mudanças técnica provocam diferenças significativas nos resultados finais. As três fontes de dados são:

- (a) o software alemão *GaBi*;
- (b) o banco de dados norte-americano *USLCI*; e
- (c) o software canadense *PavementLCA*.

3. Avaliar a aplicabilidade da ACV como técnica de estudo ambiental para a área da pavimentação, analisando criticamente aspectos positivos, pontos negativos e fontes de imprecisões relacionadas à técnica quando aplicada no processo de restauração de pavimentos asfálticos.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

No capítulo “Revisão Bibliográfica” foi abordada a técnica de ACV e como ela é desenvolvida, e explicada detalhadamente cada uma de suas quatro fases. Foi abordado também sobre o produto que será analisado nesta dissertação: pavimentos asfálticos e técnicas de sua restauração.

As quatro fases que compõem a ACV foram dissolvidas ao longo desta dissertação. A fase de escopo foi alocada no capítulo quatro: “Metodologia”, e o capítulo “Apresentação e Análise de Resultados” contém as três últimas fases da ACV: Inventário do Ciclo de Vida, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e Interpretação.

Por fim, no último capítulo, de número seis, foram apresentadas as conclusões do trabalho e algumas recomendações para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

É por meio da infraestrutura de transportes que cargas e pessoas são locomovidas, sendo tal infraestrutura, ferramenta para o crescimento econômico de um país. Para D'Agosto (2015), cada uma das fases de planejamento, projeto, construção, operação e desmobilização, que juntas compõem o ciclo de vida desta infraestrutura, causa impactos positivos ou negativos para a sociedade, para o meio ambiente e o meio físico. As fases e as consequências negativas para o meio ambiente são apresentadas na Tabela 1.

A detecção dos prováveis impactos ambientais decorrentes da construção de uma rodovia não é o único desafio, é recomendável também aplicar métodos capazes de traduzir e quantificar efetivamente esses efeitos, para isso, é necessária uma visão interdisciplinar que correlacione a atividade humana com seus possíveis impactos ambientais. Com esse tipo de análise pode-se (a) criar uma percepção mais detalhada das consequências que essas atividades causam ao meio ambiente e (b) definir medidas mitigadoras e remediadoras para que esses impactos sejam evitados ou controlados

Modelagens e técnicas têm sido desenvolvidas a fim de quantificar os impactos propiciados pela intervenção humana no meio ambiente. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma técnica para compreender os impactos causados pela fabricação de produtos, que pode melhorar seu desempenho ambiental (ganho ou perda ambiental, medidos através de indicadores) em um ou mais pontos de seu ciclo de vida (ABNT, 2009a, 2009b). Na última década, a ACV tem sido empregada na avaliação do desempenho ambiental de pavimentos e tem mostrado resultados importantes no que se refere

não somente à quantificação, ao controle e à prevenção de impactos ambientais, mas também como uma ferramenta de gestão da rede viária (CORMIER; THÉBEAU, 2003).

Tabela 1 - Reflexos ambientais das ações causadas pela infraestrutura de transportes
(Adaptado de D'Agosto, 2015)

Fases	Ações	Consequências
Construção	Intervenções iniciais (preparação)	Remoção da cobertura vegetal/habitações
	Desmatamento/desapropriação	Erosão do solo
	Movimentações de terra (corte e aterro, empréstimos e bota-foras, terraplenagem)	Poluição do ar, da água e do solo
	Obras civis (Infraestrutura, OAC/OAE)	Poluição sonora
Operação		Desperdício de energia
	Operação	Erosão do solo
	Conservação	Poluição do ar, da água e do solo
	Manutenção	Poluição sonora
Desmobilização		Desperdício de energia
	Intervenções iniciais (preparação)	Restituição da cobertura vegetal
	Movimentos da terra	Restituição da fauna
	Reflorestamento	Poluição do ar, da água e do solo
	Obras civis	Poluição sonora
		Desperdício de energia

No que se refere à construção das estruturas de pavimentos, cada classe de pavimento deve produzir impactos específicos, em função dos materiais empregados na construção de suas camadas. Os pavimentos rodoviários podem ser classificados em duas grandes categorias: asfáltico (flexível) e o de concreto de cimento Portland (rígido).

O pavimento asfáltico é composto por algumas camadas, mas, pode ser minimamente representado por um revestimento asfáltico sobre uma base de material granular ou cimentado, já o pavimento rígido é composto por uma placa de concreto de cimento Portland assentada sobre uma base de material granular ou concreto pobre rolado.

Em termos estruturais, o pavimento flexível necessita de um maior número de camadas para distribuir as tensões do tráfego em níveis admissíveis pelo subleito; já o pavimento rígido, devido às suas altas rigidez e resistência, pode distribuir melhor as tensões do tráfego, demandando um número reduzido de camadas (BERNUCCI et al., 2008; HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; HUANG, 1993; YODER; WITCZAK, 1975). Na Figura 1 está ilustrado como se apresentam as estruturas típicas de um pavimento flexível e de um pavimento rígido.

Figura 1 - Estruturas típicas para (a) pavimento rígido e (b) pavimento flexível (BERNUCCI et al., 2008)

Nos pavimentos flexíveis, as camadas de base, de sub-base e reforço de subleito são compostas por materiais pétreos e geotécnicos estabilizados (ou não) com ligantes hidráulicos, por vezes, rejeitos e subprodutos industriais são utilizados. O número de camadas do pavimento asfáltico pode aumentar por motivos econômicos, ou seja, incluem-se camadas de sub-base e reforço de subleito na tentativa de se ter reduzida a espessura da base. Essa “compensação” das espessuras traz como consequência um consumo maior de materiais, em termos absolutos. Além disso, pode ser requerido maior consumo de energia para a construção dessas camadas.

Outras demandas de insumos e energia devem surgir além daquelas do processo construtivo, porque ao longo da vida de serviço dos pavimentos se desenvolvem mecanismos de deterioração, culminando em defeitos que podem afetar (a) a condição de rolamento, em termos de trafegabilidade e conforto dos usuários, e/ou (b) capacidade de carga, em termos de se ter comprometida a estrutura do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Os processos de deterioração são intrínsecos e são promovidos pelas solicitações do tráfego e potencializados pela ação climática. Como os processos ocorrem ao longo do tempo,

há necessidade da realização de atividades de manutenção e reabilitação ao longo da vida do pavimento para garantir a qualidade do pavimento durante sua vida em serviço (FERNANDES JR; ODA; ZERBINI, 2011).

A manutenção consiste de ações para preservar a qualidade da superfície do pavimento, para que deteriorações em estágios graves sejam evitadas. No entanto, mesmo com manutenção constante, os pavimentos eventualmente necessitam de intervenções de maior porte, como as ações de restauração, que consistem da recuperação do pavimento com elevado grau de deterioração, levando a estender a vida de serviço do pavimento, melhorando consideravelmente a qualidade da estrutura e criando um novo ciclo de deterioração, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Evolução a condição do pavimento (Adaptado de KANDHAL; MALLICK, 1997)

A manutenção de pavimentos demanda, em maior ou menor grau, o consumo de materiais e energia, por exemplo, a selagem de trincas, efetuada como atividade corretiva, consome, em geral, menos material que as atividades de reabilitação de pavimentos. A reabilitação pode ser efetuada considerando duas categorias técnicas: (1) a restauração com reforço estrutural, que deve consumir mistura asfáltica, e (2) a reconstrução, que se refere à remoção e substituição total da estrutura do pavimento, demandando material pétreo e geotécnico, ligante hidráulico (eventualmente) e mistura asfáltica (FERNANDES JR; ODA; ZERBINI, 2011).

Enfim, a estratégia de manutenção e reabilitação varia em função do diagnóstico da condição do pavimento, que deve ser feita periodicamente para que a melhor solução de recuperação do pavimento seja encontrada (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

2.1.1 Restauração com reforço estrutural

O reforço estrutural, também chamado de recapeamento, é uma técnica de restauração de pavimentos muito usada que, quando projetada e executada adequadamente, melhora apreciavelmente o desempenho do pavimento. O reforço estrutural consiste da aplicação de uma nova camada de rolamento composta de mistura asfáltica superposta à superfície de um pavimento deteriorado, proporcionando melhor condição estrutural do pavimento e melhor condição de rolamento ao usuário (BALBO, 2007).

Para o lançamento e a compactação da nova camada de mistura asfáltica são procedidas a extração parcial ou total da camada deteriorada e a reperfilagem do pavimento, o que são normalmente obtidas por meio de fresagem. A fresagem pode ser feita a quente ou a frio e é realizada por corte ou desgaste de uma espessura pré-determinada da camada asfáltica a partir de processo mecânico. Com ela, pode-se minimizar a propagação de trincas e reduzir deformações de superfície (DNIT, 1997; BONFIM, 2007).

A fresagem é realizada com o uso de máquinas especiais que contenham rolos que permitam este tipo de corte. Um rolo de corte típico de máquinas fresadoras é apresentado Figura 3.

Figura 3 - Rolo de corte contido em máquinas fresadoras (BERNUCCI et al., 2006)

Segundo Bonfim (2007), com relação á temperatura do processo existem dois tipos de fresagem: a frio e a quente. A grande diferença é que, apesar do maior gasto de energia para o pré-aquecimento do revestimento na fresagem a quente, este revestimento apresenta, em contato com a alta temperatura, menor resistência ao corte.

É importante lembrar que a grande quantidade de materiais necessária para a construção e manutenção de pavimentos, ainda mais atrelada à vasta extensão de pavimentos asfálticos no país, favorece para o consumo intenso, mas, pode levar à escassez de recursos naturais.

Essa problemática foi exposta, por exemplo, na crise do petróleo da década de 70, onde foi percebida a necessidade de gerenciar melhor os recursos naturais e tentar reduzir seu consumo para evitar a escassez (BONFIM, 2007). Além desse aspecto, a produção de agregado também está associada a impactos ambientais. Como exemplo cita-se o trabalho de Cabral, Pereira e Alves (2012), onde foi apontada uma lista de impactos diretos e indiretos decorrentes da exploração de pedreiras, tais como modificação e destruição da vegetação nativa, poluição sonora e poluição do ar e danos à saúde dos trabalhadores.

Com a evolução das técnicas executivas de reforço estrutural, principalmente, impulsionadas pelo uso da fresagem, surgiram, mais recentemente, soluções de misturas asfálticas com uso do material fresado.

Assim, quanto aos materiais, dois dos tipos mais comuns de restauração realizados atualmente são (a) o reforço estrutural convencional, que utiliza apenas matéria prima virgem na produção da mistura asfáltica, e (b) a restauração envolvendo reciclagem do pavimento, onde o material fresado é aproveitado (em diferentes proporções) como material na nova mistura asfáltica.

Destaca-se que a restauração com reciclagem de pavimento é uma técnica recente e inovadora que garante alguma redução de consumo de materiais de fontes não renováveis, no entanto, pode demandar maior consumo de energia em função do emprego de equipamentos adicionais.

2.1.2 *Restauração com Reciclado de Pavimento Asfáltico*

Como alternativa para o reforço estrutural convencional existe a possibilidade de uso de material reciclado em substituição (parcial) de material virgem na composição de misturas asfálticas. Existem cinco métodos diferentes de reciclagem de pavimento (KANDHAL; MALLICK, 1997), sendo eles:

- a) reciclagem a frio (cold planning),
- b) reciclagem a quente (hot recycling),
- c) reciclagem a frio no local (cold in place recycling),
- d) reciclagem a quente no local (hot in place recycling) e
- e) reciclagem profunda do pavimento (Full depth reclamation).

Para escolher o tipo de reciclagem adequado para cada caso de restauração, além do estudo de avaliação econômica, devem ser coletados alguns dados preliminares laboratoriais e de campo que indiquem a composição do pavimento e tipos de estabilizadores que podem ser usados. Vale lembrar que a mistura asfáltica com RPA ainda pode necessitar de adição de agregado novo, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor (DNIT, 2006).

O processo de reciclagem a quente feita no local inicia-se com a fresagem do revestimento asfáltico antigo. O material fresado é misturado a agente rejuvenescedor, agregado pétreo e ligante asfáltico adicionais. Esses materiais são usinados e distribuídos sobre a superfície fresada do pavimento antigo (preparado com pintura de ligação) e compactada até que se atinja a densidade requerida.

Dois equipamentos de reciclagem de pavimento asfáltico no local já foram testados no Brasil: o método Marini e o Wirtgen. O método Marini processa a fresagem a frio e utiliza de usina móvel modelo Marini, A.R.T. 220. Já no método Wirtgen, a fresagem é feita a quente e utiliza a usina móvel Remixer da Wirtgen (apresentado na Figura 4).

De modo geral, a reciclagem do pavimento causa duplo benefício ambiental: o primeiro é a diminuição da exploração de jazidas, e o segundo é o uso reduzido de aterros sanitários (HUANG, 2007).

Figura 4 - Esquema de equipamento de reciclagem a quente no local através do equipamento da Wirtgen (DNIT, 2006)

Adicionalmente, misturas asfálticas com reciclado (RPA) podem exibir comportamento mecânico similar ou até superior ao de misturas convencionais, em outras palavras, o uso de RPA não compromete o desempenho das misturas asfálticas (COPELAND, 2011).

Nos Estados Unidos, a prática de reciclagem de pavimentos é bastante usual e é considerada uma alternativa mais sustentável que o procedimento tradicional de produção de misturas asfálticas. Entretanto, no Brasil, a prática de reciclagem na restauração ainda é pouco usual, havendo algumas limitações para sua aplicação.

Entre essas limitações, a principal se refere ao fato de o RPA apresentar variações importantes de forma e graduação quando comparado aos materiais pétreos virgens. Porém, aos poucos, os problemas de controle de qualidade dos materiais vão diminuindo e a utilização de misturas recicladas está sendo encorajada (DNIT, 2006), sobretudo pelos aspectos relacionados às economias de material e de energia no processo. Neste quesito, não somente essas economias, mas também os impactos ambientais podem ser mensurados com relativa facilidade se aplicado uma avaliação de ciclo de vida.

2.2 PANORAMA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A técnica da Avaliação do Ciclo de Vida faz parte do conceito de *Life Cycle Management* (LCM), sistema de gestão de produto que objetiva a minimização dos impactos ambientais e socioeconômicos associados a produtos durante todo seu ciclo de vida e sua cadeia produtiva, auxiliando o desenvolvimento sustentável por meio de uma melhoria contínua do sistema de produção. A LCM é uma expansão do conceito de produção mais limpa, que inclui também os conceitos de ciclo de vida e sustentabilidade. Organizações o utilizam para alcançar seus objetivos de oferecer produtos ou serviços da forma mais sustentável possível (REMMEN; JENSEN; FRYDENDAL, 2007).

Segundo Remmen, Jensen e Frydendal (2007), o conceito de LCM é um sistema de gestão de coleta, estruturação e disseminação de informações relacionadas ao produto por meio de vários programas, conceitos e ferramentas que incorporam aspectos ambientais, sociais e econômicos de um produto ao longo de todo seu ciclo de vida, sendo aspecto ambiental conhecido como elemento de atividades, produtos ou serviços de uma organização que podem interagir com o meio ambiente. O processo do LCM deve ser feito com transparência tanto dentro quanto fora da organização que a aplica e pode trazer benefícios para a empresa, tais como visibilidade, melhora da imagem e maior infiltração no mercado. Existem vários tipos distintos de ferramentas e técnicas para a LCM, incluindo: pensamento do ciclo de vida, ferramentas, técnicas (tais como a ACV), sistemas e procedimentos.

O conceito de se avaliar o ciclo de vida de produtos e procedimentos teve início entre as décadas de 60 e 70, quando se iniciou a conscientização de que a manufatura de produtos causa efeito direto nos recursos do meio ambiente (HUNT; SELLERS; FRANKLING, 1992). Porém, apenas em 1997, a técnica da ACV começou a ser padronizada com o surgimento da ISO 14040, que trata dos seus princípios e da sua estrutura. Com o tempo, outras normas da técnica surgiram, criando assim a série de Normas 14040, que foram compiladas em 2009, surgindo a ABNT 14044 (2009b).

A Avaliação Ciclo de Vida (ACV) analisa a cadeia produtiva de dado produto desde a extração e a aquisição da matéria prima até a disposição final do produto após sua utilização, oferecendo a oportunidade de medir o desempenho ambiental de produtos ou serviços (ABNT, 2009a; CHEHEBE, 1998). Ela é também considerada uma técnica de gestão

ambiental, cujo objetivo é avaliar impactos ambientais potenciais, portanto, não prevê impactos precisos ou absolutos (ABNT, 2009a).

Segundo Weidema, Ekvall e Heijungs (2009), existem duas abordagens distintas de Avaliação do Ciclo de Vida, sendo eles a abordagem atribucional e a consequential. A ACV atribucional, também considerada do tipo *status quo*, contábil ou descritiva, apresenta como objetivo atribuir a um produto definido uma parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos. Os principais fluxos de materiais do sistema do produto de interesse são descritos desde a extração da matéria-prima até a disposição dos resíduos.

A ACV consequential é considerada uma abordagem que objetiva avaliar as consequências ocasionadas por uma mudança de demanda de produto, e tem o objetivo de estimar como os fluxos de materiais e poluentes mudam como resultado de decisões que resultam em mudanças. Essa mudança não apresenta sentido temporal, ela é modelada simplesmente como a comparação entre as condições iniciais do sistema com e sem a demanda específica. A mudança pode conduzir a consequências tanto no sistema de interesse quanto fora dele, por meio de cadeias de causa-efeito.

Existe um grande interesse na ACV para tentar compreender e lidar com os impactos que ocorrem durante a vida de um produto, pois com ela é possível identificar oportunidades para melhoria do desempenho ambiental do produto, além do possível marketing que pode ser feito após a aplicação da técnica e das consequentes melhorias (ABNT, 2009a).

2.3 DESENVOLVIMENTO DE UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

No Brasil, o estudo de ACV deve seguir a Norma ABNT 14040, que define seus princípios e sua estrutura. Sua elaboração é composta por quatro fases, como apresentado no esquema da Figura 5. Nela se observa que as fases apresentam abordagem interativa, ou seja, elas podem ser revistas e alteradas durante o andamento do estudo. A seguir são discutidas com mais detalhes cada uma das quatro fases.

Figura 5 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (Adaptado de ABNT, 2009a)

2.3.1 Definição de objetivo e escopo

A definição dos objetivos é a primeira fase de qualquer ACV, pois ela será fundamental para todas as outras etapas, orientando os aspectos da definição do escopo. Além disso, o controle de qualidade da ACV também é realizado com base nos requisitos criados nos objetivos do trabalho (JRC-IES, 2010).

A *European Commission* orienta como conduzir um estudo de ACV (JRC-IES, 2010) e aponta alguns aspectos que devem ser abordados e documentados na definição dos objetivos da ACV, sendo eles:

- As aplicações pretendidas dos resultados da ACV. Como exemplos mais comuns de aplicações pretendidas encontram-se a análise de pontos fracos e comparação de bens ou serviços. É possível que a aplicação seja combinada com informações econômica e/ou social;
- As limitações relacionadas ao método escolhido, premissas e cobertura dos impactos que serão analisados;
- As razões para a realização do estudo e contexto decisório, ou seja, quais os fatores de estímulo e motivação e quais as ambições de qualidade dos dados;

- A quem se pretende comunicar os resultados do estudo. Tal público-alvo pode ser definido como “interno x externo” e também como “técnico x não técnico”;

Uma ACV pode ser feita com o objetivo de (a) identificar pontos de melhoria de produtos analisando toda sua cadeia produtiva, comparando as diferentes fases da produção ou (b) comparar a cadeia produtiva de dois produtos distintos que apresentem a mesma função a fim de escolher a alternativa mais sustentável entre as opções estudadas (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Deve-se também definir o escopo do estudo, que delimita todas as atividades e considerações que nortearão como a ACV será feita. Devido ao caráter iterativo da ACV, seu escopo pode demandar readaptações durante o desenvolvimento da ACV, pois o conhecimento do sistema produtivo aumenta com o andamento da avaliação, principalmente na fase de coleta de dados (CHEHEBE, 1998).

Segundo a ABNT (2009a, 2009b), Wenzel, Hauschild e Alting (1997) e o JRC-IES (2010) os parâmetros que devem ser delimitados na etapa de escopo são:

- Sistema;
- Funções do sistema;
- Unidade funcional;
- Fronteira;
- Procedimentos de alocação;
- Categorias de impacto e metodologia;
- Requisitos de dados;
- Pressupostos;
- Limitações;
- Tipo de análise crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

2.3.1.1 Sistema e fronteira

Pelas definições da ABNT (2009a), sistema significa o conjunto de processos que definem o ciclo de vida de um produto, por isso, compreende todo ou parte de seu ciclo de vida e os fluxos elementares necessários, sendo fluxos elementares definidos como matéria ou energia retirada do ambiente sem alteração prévia de nenhuma interferência humana.

A ABNT (2009a) define fronteira como o conjunto de critérios que delimitam quais processos fazem parte do sistema. Um exemplo de sistema delimitado por uma fronteira é ilustrado na Figura 6. Devido à complexidade e grande extensão em englobar todas as fases do ciclo de vida, os estudos de ACV podem assumir simplificações de escopo, a fim de analisar apenas parte do ciclo de vida, como se pode observar nas pesquisas de Azarijafari; Yahia; Ben amor (2015) e de Santero; Masanet; Horvath, (2011a).

Figura 6 - Exemplo de sistema e de fronteira de um sistema de ACV (ABNT, 2009a).

2.3.1.2 Função e Unidade funcional

A função e a unidade funcional do sistema são os parâmetros centrais de uma ACV. O primeiro refere-se à finalidade do produto final, sendo que produtos podem oferecer uma ou mais funções. Unidade funcional, por sua vez, é a definição quantitativa desta(s) função(ões) (JRC-IES, 2010). Wenzel, Hauschild e Alting (1997) apontam que a unidade funcional deve

conter descrições qualitativa e quantitativa do produto, incluindo sua expectativa de vida. Alguns exemplos de unidade funcional para diferentes produtos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplos de unidade funcional (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Produto	Quantidade	Duração	Qualidades
Televisão	Recepção de programas de TV em cores em uma tela de 28 polegadas	6 horas por dia durante 10 anos	Definição da imagem, qualidade do som, números de canais, controle remoto
Refrigerador	200 litros de compartimento resfriado a 5°C com temperatura ambiente de 25°C	13 anos	Precisão no controle da temperatura, prateleiras, sistema de água derretida
Tinta	Proteção de 1m ² de superfície de parede exterior, exposta a Sol e chuva	10 anos	Sem gotejamento, colorido, durável

Uma das características da unidade funcional é a localização em que o produto foi desenvolvido, para ser possível analisar melhor e quantificar o transporte necessário no processo (JRC-IES, 2010).

Inyim et al. (2016) considera a definição da unidade funcional a etapa mais importante de uma ACV, pois é ela que quantifica e qualifica o objeto de estudo através das características do desempenho do pavimento.

Exemplo de unidade funcional utilizado em estudos de ACV de pavimentos é “quilômetros por faixa”, unidade funcional bastante simplificada que, apesar de fornecer maior possibilidade de comparação com outros estudos, não abrange a complexidade de um pavimento real e acarreta em comparações de qualidade pobre. Santos et al. (2014) considerou em sua unidade funcional tanto as dimensões da seção transversal quanto a vida útil do pavimento e o tráfego local. Esse maior detalhamento proporciona uma base mais confiável para comparação entre diferentes projetos (INYIM et al., 2016). As qualidades de um pavimento que poderiam ser utilizadas na unidade funcional, por exemplo, podem ser rolamento seguro e confortável, durável e sem trincas.

2.3.1.3 Alocação

Uma das dificuldades para a elaboração de uma ACV é a alocação dos dados obtidos. A definição de alocação na ABNT (2009a) é: “repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto”. Por exemplo, na extração e refinação do petróleo recurso são causados impactos ambientais que devem ser repartidos entre todos os seus derivados, como o diesel, a gasolina e o asfalto.

Há necessidade de aplicar o procedimento de alocação em dois casos: quando uma cadeia produtiva gera mais de um produto e quando existe a reutilização de material desprezado por outro processo de produção. Essa alocação consiste em repartir os impactos ambientais entre sistemas diferentes (CHEN et al., 2010; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Os métodos de alocação mais comumente utilizados são (a) alocação física, feita a partir de valores de massa ou de volume dos materiais analisados, e (b) alocação econômica, realizado pelo valor de mercado atualizado de cada material que sofrerá a repartição dos impactos ambientais (JRC-IES, 2010; WEIDEMA, 2000; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). Apesar dos dois serem conhecidos mundialmente e aceitos em uma ACV, ainda sim o método mais utilizado é a alocação física feita a partir de valores de massa, visto que é o mais simples de ser aplicado, pode trazer resultados confiáveis e não sofre mudanças ao longo do tempo, como ocorre com a alocação feita com valores econômicos.

Para ilustrar esses dois processos de alocação, toma-se um caso hipotético em que um caminhão realiza mutualmente o transporte de dois produtos, X e Y, e que os impactos causados por tal transporte devem ser alocados entre estes dois produtos. Caso a alocação seja feita em valores de massa, os impactos ambientais serão repartidos pela diferença em massa entre os dois produtos, ou seja, se X apresentar, dentro do caminhão, maior massa comparado com Y, ele apresentará também maior proporção dos impactos ambientais. Entretanto, caso a alocação seja feita em valores econômicos, e se Y for um produto de valor maior que X, mesmo em menor quantidade, ele pode carregar a maior parte dos impactos do transporte (ABNT, 2014).

Existe também a possibilidade de não considerar o processo de alocação no estudo, porém para isso é necessário realizar procedimentos para evitá-lo, tais como a expansão do sistema ou a divisão deste sistema em processos separados (JRC-IES, 2010; WEIDEMA, 2000; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Apesar de a alocação ser um processo necessário para a ACV, a decisão do melhor método para sua aplicação não apresenta consenso entre os especialistas, portanto as considerações para sua aplicação devem ser feitas com o máximo de transparência em um trabalho de ACV (HARVEY; MEIJER; KENDALL, 2014).

A escolha do método de alocação traz subjetividade para o estudo de ACV, pois pode alterar consideravelmente os resultados finais e reduzir sua confiabilidade (WEIDEMA, 2000). Essa alteração nos resultados pode ser observada na Figura 7, onde é apresentada a comparação entre os resultados de impactos ambientais utilizando três métodos distintos de alocação para a análise de impactos ambientais da escória de auto-forno, material alternativo, considerado resíduo em outro sistema, e comparado aos impactos ambientais associados ao uso do cimento Portland.

Figura 7 - Efeito do método de alocação nos resultados de impacto ambiental (CHEN et al., 2010)

Nesse gráfico comparativo, onde foi fixado o valor de referência (100%) para todos os impactos ambientais no uso de cimento Portland, observa-se que esses valores, comparados com os valores relacionados ao material alternativo com processo de alocação por massa, se apresentam sempre inferiores, apresentando resultado que desestimularia o uso do resíduo. Já

quando os impactos ambientais deste mesmo resíduo não passam por nenhum processo de alocação, o cimento mostra-se nesse caso uma opção menos sustentável, já que a não alocação fez com que o material alternativo não acrescentasse impacto ambiental adicional neste sistema analisado. Esse trabalho de Chen et al. (2010) mostra que os resultados e até mesmo as conclusões sofrem alterações quando a ACV passa por tipos de alocação distintos.

2.3.1.4 Categoria de Impacto

As categorias de impacto e a metodologia utilizada para avaliação dos impactos devem ser previamente selecionadas de acordo com o objetivo definido, bem como o modo de interpretação subsequente. Alguns exemplos de impactos potenciais que podem ser selecionados em uma ACV são: mudanças climáticas, depleção de ozônio, toxicidade humana, acidificação, ecotoxicidade, depleção de recursos, entre outros (JRC-IES, 2010).

2.3.2 *Inventário do Ciclo de Vida (ICV)*

A análise do inventário é a fase de coleta de dados necessários para alcançar o objetivo estipulado e que deve abranger todo o sistema definido, o que pode incluir: matéria-prima, energia, transporte, emissões, resíduos e quaisquer outros dados necessários. Também são definidos os procedimentos de cálculos a serem utilizados para quantificar as entradas e saídas do sistema do produto (ABNT, 2009a). Estes cálculos consistem em um balanço de massa e de energia que configura o Inventário de Ciclo de Vida (ICV), fase em que talvez já seja possível fazer algumas conclusões prévias sobre os efeitos ambientais do sistema (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2012). Durante o processo de coleta de dados, nesta segunda fase da ACV, pode surgir a necessidade de realizar alterações na etapa anterior (objetivo e escopo), pois conforme os dados são coletados ocorre um entendimento maior sobre o sistema estudado, fazendo-se convenientes tais mudanças.

A forma como esses dados serão coletados depende do objetivo e escopo do estudo, da disponibilidade de dados, dos requisitos de qualidade e dos recursos disponíveis. Salienta-se que, para manter a transparência exigida por um estudo de ACV, as fontes de dados devem ser sempre identificadas (JRC-IES, 2010).

Existem dois tipos de dados usados em uma ACV: os dados primários e os dados secundários. Os dados primários podem ser coletados diretamente dos produtores do bem ou do serviço, ou podem ser obtidos através de cálculos, patentes e opiniões de especialistas. Podem também ser coletados de dados públicos e comerciais. Os dados secundários, por sua vez, são extraídos de pesquisas, requeridos por consultores ou coletados em softwares disponíveis no mercado que fornecem dados próprios e frequentemente atualizados (JRC-IES, 2010; HARVEY; MEIJER; KENDALL, 2014).

Exemplo de software disponível no mercado e com banco de dados extenso e de qualidade é o software alemão *GaBi*, desenvolvido pela empresa PE INTERNATIONAL. Apareceu pela primeira vez em 1992. Apesar de alemão, ele contém dados globais e dados brasileiros, importante fator para pesquisas de ACV desenvolvidas no Brasil. Além do banco de dados, ele oferece a possibilidade de realizar os cálculos necessários para a terceira fase da ACV de forma automatizada, a partir do método de AICV selecionado pelo usuário do software. Para utilizá-lo é preciso comprar sua licença ou obter a licença de estudante.

Existe também a possibilidade de utilizar banco de dados informais disponíveis livremente, como o caso do banco de dados norte-americano *USLCI* (*United States Life Cycle Inventory*), desenvolvido pelo laboratório nacional da energia renovável (NREL) e o Instituto Athena, disponível desde 2003. Ele que compila dados de diferentes instituições dos Estados Unidos.

Outro exemplo de banco de dados é o *PavementLCA*, software livre canadense também desenvolvido pelo Instituto Athena na tentativa de facilitar e agilizar o desenvolvimento de ACV dedicadas exclusivamente para projetos de pavimento. Os dados utilizados pelo programa são fornecidos pelo Instituto Athena e pelo *SimaPro*, porém tais dados não são acessíveis para o usuário do software.

2.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem como função estimar os impactos potenciais relacionados ao sistema delimitado na fase de escopo. Esse processo associa os dados coletados na fase de ICV às categorias de impactos. Para cada uma das categorias de impacto um indicador é utilizado no intuito de quantificar e comparar os

impactos selecionados, tais como equivalente de CO₂ para o impacto de aquecimento global, ou equivalente de SO₂ para o impacto de acidificação (ABNT, 2009b).

Segundo a Norma ABNT ISO 14044 (2009b), esta fase é feita em três etapas. A primeira é a de seleção das categorias de impacto, feita a partir do reconhecimento de quais destas categorias apresentam impactos ambientais significantes, junto com seus respectivos indicadores. Após selecionar as categorias de impacto ocorre a segunda etapa, a de classificação, onde ocorre a compreensão das consequências de cada tipo de emissão ao meio. A JRC-IES (2010) ainda cita uma quarta fase, opcional: a fase de ponderação, onde são correlacionados diferentes pesos de importância para as diferentes categorias de impacto.

Exemplos dos tipos de emissões associados aos impactos ambientais que eles acarretam se encontram na Tabela 3, nela é possível observar que mais de uma substância é relacionada para cada impacto ambiental, por exemplo, as substâncias HCF 22, CH₄, tolueno, SO₂ e NO_x, onde todas contribuem para o aquecimento global potencial. Nota-se também que uma mesma substância pode causar impactos ambientais distintos, por exemplo o SO₂, que contribui tanto para o aquecimento global quanto para a toxicidade humana.

Tabela 3 - Exemplos de substâncias que contribuem para diferentes impactos ambientais (Adaptado de WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997)

Impacto	HCF 22*	CH ₄	Tolueno	PCB**	SO ₂	NO _x
Aquecimento global	X	X	X		X	X
Depleção de ozônio	X	X				
Criação de ozônio fotoquímico		X	X			X
Eutrofização						X
Toxicidade humana			X	X	X	X
Ecotoxicidade			X	X		

* Clorodifluorometano ** Bifenilpoliclorado

Por fim, ocorre a terceira etapa, a de caracterização da AICV. Para quantificar um impacto potencial são necessários fatores de equivalência das substâncias causadoras deste impacto. A Tabela 4 apresenta como exemplo os fatores de equivalência para o impacto potencial de aquecimento global. Nela é possível observar que um grama de monóxido de carbono causa impacto no aquecimento global duas vezes maior que um grama de dióxido de carbono, independente da amplitude temporal, sendo, portanto, uma substância menos alarmante para o aquecimento global que o monóxido de carbono. Algumas substâncias

também se modificam ao longo do tempo, alterando o fator de equivalência caso a análise seja feita para ciclos de vida de 100 anos ou mais.

Tabela 4 - Fatores de equivalência para o impacto de aquecimento global (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997)

Substância	Fatores de equivalência (g CO ₂ eq/g substância)		
	20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de carbono (CO ₂)	1	1	1
Monóxido de carbono (CO)	2	2	2
Metano (CH ₄)	62	25	8
Óxido de nitrogênio (N ₂ O)	290	320	180

Desenvolver fatores de equivalência para quantificar impactos ambientais requer um extenso trabalho de modelação, que exige uma equipe multidisciplinar para seu desenvolvimento, porém já existem modelos disponíveis que são amplamente utilizados. Mendes, Bueno e Ometto (2015) destacam que esses modelos apresentam abrangência particular de aplicação, podendo ser global, continental ou regional, sendo necessário analisar as características do modelo para utilizar o mais apropriado para as condições do estudo. Em geral, esses modelos foram desenvolvidos na Europa, como o EDIP, *CML* e *Eco-Indicador 99*. Outros modelos conhecidos são o modelo norte-americano *TRACI* e o modelo japonês *LIME* (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Ainda não há um método sul-americano, por isso, é recomendado utilizar os modelos tais como EDIP (versão de 1997), *TRACI* e *CML* para ACVs desenvolvidas no Brasil, por se tratarem de modelos globais (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

A Figura 8 exemplifica o processo de conversão dos dados coletados na etapa de ICV (classificação e caracterização) para os resultados de impacto potencial de aquecimento global (PAG), de potencial de acidificação (PA) e de potencial de eutrofização (PE). Este processo pode ser feito inteiramente pela pessoa que desenvolve a ACV, em planilhas *Excel*, por exemplo. Entretanto, uma maneira mais fácil de realizar a ACV é automatizando os cálculos de AICV por meio de programas que oferecem essa possibilidade, tais como os softwares *GaBi* e *SimaPro*.

Inventário	Categorias de impacto	Fatores de equivalência	AICV
Emissions to air CO ₂ 1.3 kg CO 3 kg CH ₄ 6 kg SO ₂ 0.001 kg NO _x 0.08 kg HCl 0.9 kg	PAG PA PE	1.3 kg CO ₂ * 1 3 kg CO * 3 6 kg CH ₄ * 25 0.001 kg SO ₂ * 1 0.08 kg NO _x * 0.7 0.9 kg HCl * 0.88 0.08 kg NO _x * 0.13 2 kg PO ₄ * 1 0.1 kg NH ₃ * 0.33	160.3 kg CO ₂ Eq. 0.849 kg SO ₂ Eq. 2.043 kg PO ₄ Eq.
CLASSIFICAÇÃO		CARACTERIZAÇÃO	

Figura 8 - Exemplo de classificação e caracterização para obtenção de valores de AICV (PE INTERNATIONAL, 2013)

Foi desenvolvida em 1997, na Dinamarca, a primeira versão do método EDIP (*Environmental Design for Industrial Products*). Este método de AICV tem caráter global e ainda hoje é aceito e utilizado em estudos de ACV para quantificação de impactos ambientais potenciais (OMETTO, 2005).

A seguir são explicadas categorias de impactos ambientais potenciais possíveis de serem analisadas pelo método EDIP 1997 (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). Os impactos potenciais de eutrofização e de depleção de ozônio também são possíveis de serem calculadas pelo método EDIP 1997, entretanto estes impactos não foram abordados neste trabalho, pois apresentaram valores iguais a zero para o sistema definido.

2.3.3.1 Potencial de Aquecimento Global

Para entender sobre o impacto de aquecimento global, deve-se compreender primeiro sobre o processo natural de aquecimento natural da Terra, onde parte das radiações do Sol atinge a superfície do planeta e é absorvida, e a outra parte é refletida como radiação infravermelha. Novamente, essa fração da radiação do Sol passa por outra divisão: a fração da radiação absorvida e a fração da radiação refletida, que volta a ser radiada em todas as direções da superfície terrestre (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Entretanto, o lançamento de alguns tipos de emissões na atmosfera pode favorecer para que esse processo, então natural, se intensifique, e que a radiação que incidiu naturalmente na atmosfera terrestre fique aprisionada, causando assim o aumento global da temperatura média, ou seja, o aquecimento global.

Exemplos de emissões que contribuem para o processo de aquecimento global são o gás carbônico (CO_2), o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH_4). Todos eles são encontrados na natureza, mas lançados em grande escala pelas indústrias e cidades. A Figura 9 ilustra o processo descrito.

Figura 9 - Impacto ambiental potencial de aquecimento global (PE INTERNATIONAL, 2013)

As principais fontes desses gases são a combustão de combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural. O indicador desse impacto potencial é expresso em quantidade de gás carbônico equivalente (CO_2eq) (PE INTERNATIONAL, 2013; WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

2.3.3.2 Potencial de Acidificação

Alguns poluentes do ar, tais como dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, podem ser transformados em ácidos que causam a redução do pH da água de chuva, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Impacto ambiental potencial de acidificação (PE INTERNATIONAL, 2013)

As consequências dessa redução do pH podem causar danos aos ecossistemas naturais como também alguns impactos indiretos, tais como a redução de nutrientes dos solos e maior solubilidade de metais em solos. Porém, até construções e seus materiais podem passar por consequências alarmantes, pois é possível encontrar metais e rochas naturais corroídas devido ao ácido encontrado em chuvas (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

O indicador usado para o impacto ambiental potencial de acidificação é expresso em dióxido de enxofre equivalente (SO_2eq).

2.3.3.3 Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico

A substância O_3 , conhecida como ozônio, apresenta um papel importante para a proteção da Terra, porém essa proteção ocorre apenas quando ela é acumulada na estratosfera, camada superior a da atmosfera terrestre. Quando essa mesma substância é acumulada na superfície da Terra, ela passa a provocar danos tanto para a vegetação, afetando a produtividade na agricultura, quanto para a saúde pública, podendo acarretar em problemas respiratórios em humanos (PE INTERNATIONAL, 2013).

A produção do ozônio ocorre quando solventes e outros compostos orgânicos voláteis são lançados na atmosfera em local seco através do processo de oxidação, que ocorre com a incidência da radiação solar e a presença de óxidos de nitrogênio (NO_x). A maior fonte antrópica de compostos orgânicos voláteis é a operação de transportes e o consumo de derivados do petróleo (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). O processo de formação fotoquímica de ozônio troposférico é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Impacto ambiental potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico (PE INTERNATIONAL, 2013)

O óxido de nitrogênio não é a substância que causa o efeito de formação fotoquímica de ozônio na troposfera diretamente, mas sua importância é tão considerável para o processo que existem dois tipos de fatores de equivalência para o impacto potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico, dependendo de sua concentração: em regiões com baixa concentração de NO_x e o outro em regiões de alta concentração de NO_x. Pode ser considerado que, em áreas urbanas, a concentração desta substância é constantemente alta. Para ambos os cenários citados o indicador utilizado é eteno equivalente (C₂H₄eq) (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

2.3.3.4 Potencial de Ecotoxicidade

A ecotoxicidade ocorre quando o lançamento de emissões e efluentes, tais como eteno, benzeno e tolueno, afetam ecossistemas e os seres vivos que fazem parte deles. Quando os poluentes lançados apresentam alta concentração de substâncias perigosas à vida ocorre a ecotoxicidade aguda, frequentemente resultando em mortes dos organismos expostos. Por sua vez, os efeitos quando os poluentes não acarretam em alta mortalidade dos organismos em curto prazo, são chamados de ecotoxicidade crônica. A ecotoxicidade crônica pode ser acumulada em organismos, ser biodegradada em uma taxa bastante baixa e trazer efeitos tais como redução na capacidade reprodutiva, reduzindo, portanto, as chances de sobrevivência da espécie afetada. Para considerar que uma substância contribua para o impacto de ecotoxicidade ela deve ser tóxica para os organismos do ecossistema ou afetar sua interatividade em seu habitat natural.

São três os parâmetros levados em consideração para criar os fatores de caracterização da ecotoxicidade: a dispersão da substância no meio ambiente, a característica

ecotoxicológica da substância e a biodegradabilidade dela. Todos os parâmetros são relacionados exclusivamente à substância, não envolvendo o ambiente em que ela foi emitida.

A ecotoxicidade é um impacto de escala local e regional e é analisada separadamente entre ecotoxicidade do ar, do solo e da água. Ela é expressa em metros cúbicos, que correspondem ao volume do meio (ar, água ou solo) ao qual a emissão deve ser diluída para que a concentração da substância seja baixa suficiente a ponto das substâncias danosas não apresentarem mais os efeitos da ecotoxicidade. Exemplos de substâncias que podem causar a ecotoxicidade tanto do solo quanto da água e do ar são o bifenilpoliclorado e metais pesados. (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

2.3.3.5 Potencial de Toxicidade humana

O potencial de toxicidade humana é semelhante ao conceito do impacto potencial de ecotoxicidade, e apresenta diferenciação entre toxicidade aguda e toxicidade crônica, ela ocorre quando o ser humano é exposto a substâncias que são danosas a ele mesmo. As vias de exposição mais recorrentes são através da respiração e da ingestão de alimentos.

O ser humano pode ser intoxicado através da água, do solo e do ar, e o indicador utilizado, assim como na ecotoxicidade, é representado em metros cúbicos (água, solo ou ar) necessários para diluir no meio a ponto de que as substâncias tóxicas não apresentem mais efeitos tóxicos para o homem.

A toxicidade humana pode ocorrer por três vias distintas: água, ar e água, e é, na maioria dos casos, considerada um impacto de escala local e regional. Entretanto, em alguns casos, quando as substâncias são resistentes ao longo do tempo, não degradáveis, e quando são facilmente transportadas, a toxicidade pode ter caráter global (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). Assim, como o impacto potencial ambiental da ecotoxicidade, a toxicidade humana também pode ocorrer com a presença de substâncias tais como bifenilpoliclorado e metais pesados.

2.3.4 *Interpretação*

Nesta última fase, os resultados são sumarizados e discutidos, com identificação de pontos relevantes de acordo com os objetivos da ACV. Esta fase inclui também verificações de qualidade do estudo. Identificar limitações e fazer recomendações acerca da cadeia de produção também faz parte da fase de interpretação (ABNT, 2009b).

Segundo JRC-IES (2010), a fase de interpretação é dividida em três etapas. A primeira fase é a identificação de questões relevantes, onde se deve analisar e estruturar os resultados das fases anteriores com o objetivo de identificar, por exemplo, os estágios da cadeia produtiva, os fluxos e as matérias que mais causaram impactos ambientais, assim como as categorias de impactos que se mostraram em maior escala.

A segunda etapa da fase de interpretação envolve três parâmetros para analisar a qualidade dos resultados, sendo eles (ABNT, 2009a; JRC-IES, 2010):

- completeza, verificação se as informações são suficientes para chegar a conclusões de acordo com a definição de objetivo e escopo;
- consistência, verificação se os pressupostos, métodos e dados definidos na fase de objetivo e escopo foram aplicados de forma consistente ao longo de todo o estudo; e
- sensibilidade, verificação se as escolhas feitas em termos de métodos e dados afetam os resultados obtidos.

Para exemplificar a fase de interpretação de uma ACV, utiliza-se o estudo de Weiland e Muench (2010), onde foram estudadas soluções diferentes de manutenção para um trecho de rodovia de concreto de cimento Portland. Três estratégias de manutenção foram testadas: (a) substituir a placa de concreto deteriorada por nova placa (PCC), (b) recapear com mistura asfáltica usinada a quente (HMA) e (c) sobrepor mistura usinada a quente utilizando parte do pavimento antigo (CSOL). A Figura 12 apresenta os resultados da ACV, em termos de energia consumida (em TJ) das diferentes estratégias construtivas.

Figura 12 - Exemplo de avaliação de consumo de energia total (WEILAND; MUENCH, 2010).

Observando o gráfico da Figura 8, é possível apontar que cada estratégia apresenta consumo de energia particular nas diferentes fases consideradas e, a partir dos resultados, entende-se que os processos que mais consumiram energia foram a de produção de materiais e a de produção de combustíveis e eletricidade. Observa-se também que, de maneira geral, a estratégia que consumiu maior energia foi a que considerou o recapeamento do pavimento existente com mistura asfáltica (HMA) e a estratégia que consumiu menor energia foi a solução com sobreposição de mistura asfáltica usinada a quente com reutilização do material do pavimento antigo (CSOL).

Por fim, é necessária uma revisão crítica, assim como definida no escopo da ACV. Esta revisão avalia, de acordo com as Normas ABNT ISO 14040 e 14044 (2009a, 2009b), se o método é válido, se os dados são apropriados, se as interpretações são coerentes e se o trabalho como um todo é transparente e consistente (JRC-IES, 2010).

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS

Um dos primeiros estudos encontrados que utiliza a Avaliação do Ciclo de Vida na área de infraestrutura de transportes foi o de Häkkinen e Mäkelä (1996), feito na Finlândia. Nele foi feita a ACV comparando os ciclos de vida completos (construção, manutenção, uso e fim de vida) de um pavimento asfáltico e de concreto de cimento Portland. Estes autores concluíram que o pavimento de concreto consumiu menor quantidade de energia, entretanto

que este mesmo tipo de pavimento apresenta maior potencial de aquecimento global quando comparado com pavimentos asfálticos.

Horvath e Hendrickson (1998) também concluíram que o ciclo de vida de pavimentos asfálticos está associado a maiores consumos de energia, além de maior geração de resíduos perigosos, ou seja, resíduos que podem causar dano ou até morte em seres vivos. Entretanto, são os pavimentos flexíveis que apresentam maior possibilidade de reciclagem quando comparado com os pavimentos rígidos, apresentando economia de recursos naturais e, consequentemente, menor emissão de poluentes na produção de materiais.

Durante as duas décadas que sucederam a primeira ACV de pavimentos, é possível observar uma tendência de estudos comparativos entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos, com o intuito de apontar, entre os dois tipos de pavimentos mais utilizados no mundo, qual deles seria considerado mais sustentável (INYIM et al., 2016; SANTERO; MASANET; HORVATH, 2011a). Existe também uma quantidade considerável de trabalhos que estudam diferentes estratégias de restauração.

No início, os trabalhos se concentravam basicamente nos Estados Unidos, porém aos poucos o tema foi ganhando popularidade e outras partes do mundo foram desenvolvendo pesquisas similares. Hoje, Canadá, Europa, Austrália e Coreia do Sul, por exemplo, utilizam a técnica da ACV para auxiliar em tomadas de decisões entre diferentes opções de pavimentos (VENTURA; JULLIEN, 2009).

Em um estudo português, na Universidade do Minho, Araújo et al. (2012) fez uma ACV comparando duas estratégias de restauração de pavimento asfáltico diferentes, uma delas avaliou a técnica convencional, utilizando apenas materiais virgens; e outro cenário avaliou a técnica com reciclagem de material, utilizando 50% de RPA na composição de uma camada de base negra. A conclusão mostrou que a restauração com aproveitamento de RPA apresentou grandes vantagens ambientais em comparação com a opção convencional. As emissões de CO₂ equivalente, por exemplo, apresentaram uma redução de 20,5%.

Em 2000, a *Environmental Protection Agency* (EPA) analisou a ACV como técnica para avaliação de impactos ambientais na área de infraestrutura de transportes, e pôde concluir que a ACV pode ser eficiente para este objetivo (SCHENCK, 2000). Entretanto Inyum et al. (2016) concluiu que esta técnica não é suficiente para comparar diferentes estratégias de pavimentação devido a grandes incertezas atreladas a esse tipo de estudo, tais

como dados utilizados, definição de unidade funcional e considerações de estratégias de restauração e manutenção,

Harvey et al. (2010) desenvolveram e propuseram uma diretriz para o desenvolvimento de uma ACV destinada exclusivamente a pavimentos, devido justamente a este considerável grau de incertezas que um estudo de ACV em pavimentos pode apresentar, ainda mais observando o problema de que cada estudo é feito com escopo, fontes de dados e métodos de AICV distintos, fazendo com que duas ACVs com mesmo objetivo apontem resultados distintos. Esta diretriz, portanto, tenta sugerir um padrão de ACV de pavimentos para que essas incertezas e divergências entre estudos sejam reduzidas.

Um ponto de divergência comum entre os estudos no tema de ACV em pavimentos é o sistema considerado. Santero, Masanet e Horvath (2011b) constataram que a ACV completa de um pavimento deve abranger todas as fases de vida desse produto, a saber: aquisição de matéria prima, processamento do material, uso e fim da vida. O ciclo de vida completo de um pavimento é apresentado no esquema da Figura 13, onde se encontram relacionadas as ações, interações e os impactos ambientais provocados por cada um dos cinco componentes do seu ciclo de vida.

Figura 13 – Fases do ciclo de vida típico de pavimentos e seus componentes (SANTERO; MASANET; HORVATH, 2011a)

Porém, devido à frequente dificuldade de um estudo englobar todas as fases de vida de um pavimento é normalmente feita uma simplificação do escopo a fim de analisar apenas

parte de todo o ciclo de vida do produto, em vez de estudar todo o ciclo de vida do pavimento (AZARIJAFARI; YAHIA; BEN AMOR, 2015; SANTERO; MASANET; HORVATH, 2011a).

Como exemplo de ACV que analisa apenas parte do ciclo de vida do pavimento, o trabalho de Santos et al. (2014), nos Estados Unidos, realizou uma ACV comparando técnicas diferentes de restauração de um pavimento rígido do estado de Virginia, são elas: reconstrução utilizando RPA, reconstrução convencional e um cenário sem reabilitação, aplicando apenas intervenções superficiais mais frequentes. As atividades de cada cenário foram contabilizadas para um período de análise de 50 anos. A Tabela 5 apresenta os métodos empregados e os períodos dessas intervenções. Desse estudo, os autores concluíram, ao final, que apesar da manutenção corretiva ser uma estratégia mais simples, sua maior frequência faz com que, em longo prazo, ela apresente os maiores valores de impacto ambiental.

Tabela 5 – Diferentes estratégias de manutenção e reabilitação de um pavimento para estudo de ACV comparativa (SANTOS et al., 2014)

Estratégia	Atividades futuras de M&R
Restauração com reciclado	Ações de manutenção após 12, 22, 32 e 44 anos
Restauração tradicional	Ações de manutenção após 12, 22, 32 e 44 anos
Manutenção corretiva	Ações de manutenção após 4, 10, 14, 18, 24, 28, 34, 44 e 48 anos

Outro exemplo de pesquisa sobre ACV de pavimentos com o sistema simplificado é a de Robinette e Epps (2011), que também teve como objetivo o de analisar três métodos distintos de manutenção e restauração, o primeiro envolvendo restauração com reciclado a frio, o segundo com reciclagem profunda a frio, e o terceiro, a restauração a quente, todas sendo realizadas no local. Ao final os autores concluíram que restaurações com reciclagem no local apresentam resultados mais sustentáveis e econômicos comparados com resultados de restauração convencional.

Apesar da ACV ser usada como técnica de caráter comparativo, essa aplicação se mostra bastante complexa quando se tenta comparar casos e resultados encontrados em pesquisas distintas. Para ilustrar essa dificuldade, alguns parâmetros encontrados em seis estudos envolvendo restauração de pavimento asfáltico foram compilados na Tabela 6.

Tabela 6 - Diferenças nos parâmetros da ACV de pavimentos entre estudos encontrados na literatura

Autor	Método de AICV	Unidade Funcional	Fases analisadas
ZHANG et al., (2010)	LCO	4 faixas de largura 3,6m; com acostamento, tempo de análise de 40 anos e tráfego de 70.000 VDM com 8% de veículos pesados	Material, processamento, M&R, uso, fim de vida
CROSS et al. 2011	PaLATE	2 faixas de largura 3,65m	Material, processamento e M&R
WANG et al. (2012)	Desenvolvido pelo autor	2 e 4 faixas, e com tempo de análise de 5 anos. Tráfego de 34.000 VDM com 35% de veículos pesados e 3.200 VDM com 15% de veículos pesados	Material, processamento, M&R e uso
ROBINETTE e EPPS (2011)	PaLATE	1 e 2 faixas de largura 3,6m; com acostamento e tempo de análise de 20 anos. Tráfego com Volume alto e volume baixo (sic)	Material, processamento, construção e M&R
SANTOS et al. (2014)	Desenvolvido pelo autor	2 e 4 faixas e com tempo de análise de 50 anos. Tráfego de 25.000 VDM e 28% de veículos pesados	Material, processamento, M&R e uso
GIANI et al. (2015)	GGP e ReCiPe	4 faixas de largura 3,75m e tempo de análise de 30 anos	Material, processamento, construção e M&R

M&R: Manutenção e Restauração

A Tabela 6 mostra que cada pesquisa apresenta suas particularidades no escopo de suas ACVs. Como consequência, os resultados que cada um desses estudos apresentaram são bastante diferentes entre eles. O trabalho de Robinette e Epps (2011), por exemplo, define as dimensões do pavimento analisado para a unidade funcional, enquanto o de Santos et al. (2014) não. O tempo de análise e o tráfego considerado também são bastante diferentes.

O fato de duas pesquisas utilizarem métodos de AICV distintos também desfavorável para a comparação não só pelos fatores de caracterização e, conseqüentemente, os cálculos serem diferentes, mas também, por oferecerem ao estudo de ACV categorias de impactos próprios, muitas vezes que não são utilizados em outros métodos. Wang et al. (2012), que desenvolveram um modelo de AICV para a pesquisa, analisaram consumo de energia e impacto potencial de aquecimento global, por sua vez Robinette e Epps (2011), por meio do

modelo PaLATE, estudaram energia, emissão de CO₂ e custo. Já Giani et al. (2015) estudaram uma lista maior de impactos, incluindo mudança climática, radiação, ocupação de terra e depreciação de materiais.

A respeito das particularidades, analisando as conclusões dos estudos selecionados, é possível observar uma tendência de concluir que a reciclagem de pavimentos, independente de qual técnica de reciclagem empregada, seja mais vantajosa ambientalmente, embora tenham delimitado o escopo de suas pesquisas diferentemente, como exemplo: (a) Cross et al. (2011) concluíram que restauração com reciclagem a frio no local apresenta menores valores de aquecimento global e de consumo de energia comparado com recapeamento convencional, (b) Robinette e Epps (2011) concluíram que restaurações com reciclagem no local apresentam resultados mais sustentáveis e econômicos comparados com resultados de restauração convencional, (c) Santos et al. (2014) apontou que práticas de reciclagem de pavimento no local e controle efetivo da rugosidade do pavimento geram melhora significativa no desempenho ambiental no ciclo de vida de pavimentos, e (d) Giani et al. (2015) concluíram que o pavimento que combinou o uso de RPA e misturas asfálticas mornas apresentaram redução nos impactos ambientais analisados.

Entre as duas pesquisas que não envolveram a reciclagem de pavimento em suas estratégias de restauração, a pesquisa de Zhang et al. (2010) concluiu que a restauração com pavimento asfáltico apresentou maior consumo de energia e maior potencial de aquecimento global comparado com restauração com pavimento rígido. Já a pesquisa de Wang et al. (2012) mostrou que restaurações preventivas de pavimento submetido a tráfego pesado apresentaram melhores resultados de consumo de energia e emissões de gás carbônico quando comparado com pavimento submetido a tráfego leve.

Apesar das conclusões gerais entre os estudos que envolveram reciclagem de pavimento serem muito similares, cada pesquisa apresenta, devido a falta de padronização no delineamento do escopo em pesquisas de ACV com pavimentos, valores absolutos diferentes e algumas variantes de conclusões mais específicas.

Para ter uma ideia do quanto o tema Avaliação do Ciclo de Vida em pavimentos está sendo pesquisado, foi feita uma busca de artigos em quatro das principais bases de dados científicos do mundo: *Google Scholar*, *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*. A busca foi feita selecionando apenas artigos que apresentassem no título a seguinte *string* de pesquisa:

“*life cycle assessment*” AND *pavement**. O resultado deste levantamento bibliográfico se encontra na Figura 14.

Figura 14 - Quantidade de artigos publicados sobre o tema disponíveis no dia 30/06/2016

Observa-se que, nesta análise bibliométrica, um número considerável de artigos científicos surgiu, além disso, é possível observar que, de modo geral, houve um crescimento gradual na quantidade de artigos que abordam o tema de Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos.

A busca por pesquisas do tema de ACV em pavimentos no Brasil foi feita nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, por oferecerem a opção de restringir o levantamento bibliográfico apenas para pesquisas feitas no Brasil. A busca nestas duas plataformas foi feita com a mesma string de pesquisa: “*life cycle assessment*” AND *pavement*. O mesmo foi feito em português, porém não foi encontrada nenhuma pesquisa brasileira sobre ACV na área de pavimentos até os dias atuais.

O tema foi pesquisado também na Revista Transportes e foi encontrado o trabalho de D’Agosto et al. (2014), que aplicaram o Inventário do Ciclo de Vida para comparar seis alternativas energéticas para o transporte público urbano da cidade do Rio de Janeiro.

Por essa pesquisa bibliométrica realizada, pode-se dizer que o tema de impactos ambientais analisados pela técnica de Avaliação do Ciclo de Vida na área de infraestrutura de

pavimentos é incipiente no Brasil e, portanto, é necessário o incentivo do tema para o país, com intenção de incorporar o desempenho ambiental em projetos de pavimentação.

3. METODOLOGIA

Os estudos de ACV aplicados na infraestrutura de pavimentos podem ser divididos entre aqueles que utilizam de projetos reais de pavimentação e aqueles baseados em dados de um projeto hipotético. As duas vertentes tem o seu valor, a primeira, por mostrar um estudo de caso e resultados específicos, e o segundo, por analisar casos genéricos que trazem resultados e conclusões de trechos ou de projetos típicos.

Nesta pesquisa, propõe-se o estudo de ACVs de um trecho hipotético de pavimento asfáltico. Entretanto, alguns dos parâmetros requeridos no escopo da ACV, como a geometria do trecho, a seção da estrutura do pavimento, o tráfego e a vida útil de projeto, tiveram como base um projeto de reforço de um pavimento real do interior do estado de São Paulo.

Por sua vez, para uma comparação entre as restaurações com mistura asfáltica convencional e com RPA, as considerações de desempenho destes pavimentos hipotéticos foram adotadas com base nas de Hong, Chen e Mikhail (2011), que partiram da premissa de que pavimentos com reforço estrutural de 5 centímetros de espessura de mistura asfáltica convencional (do tipo CAUQ) composto de materiais virgens apresentam o mesmo desempenho e durabilidade que pavimentos com reforço estrutural de 5 centímetros de mistura asfáltica composta com 35% de RPA.

O modelo de AICV selecionado para as ACVs realizadas com dados do *GaBi* e os do *USLCI* foi o EDIP 1997, visto que este modelo é o mais indicado para ACVs desenvolvidas para a realidade brasileira por ser um modelo global. No caso do software *PavementLCA* foi realizada com o modelo *TRACI*, já que o programa não permite alterações e modificações.

Neste capítulo é apresentada a estrutura do estudo de impactos ambientais pela técnica Avaliação do Ciclo de Vida, incluindo-se os parâmetros que compõem a fase de escopo de uma ACV, definidos pela ISO 14040 e ISO 14044.

3.1 ESCOPO

- Função do sistema

A função do sistema é a restauração do revestimento asfáltico, garantindo aos usuários do pavimento, transporte de cargas e pessoas de forma segura, confortável e econômica durante o tempo de 10 anos.

- Unidade funcional

A unidade funcional considerada para o estudo é de restaurar um quilômetro de revestimento asfáltico de qualidade, com faixa de 8 metros de largura, sujeita a tráfego de $2,0 \times 10^7$ (calculada pelo método USACE), e com vida útil do pavimento e período de análise de 10 anos.

- Fluxo de Referência

Para atender a unidade funcional delimitada, atribuiu-se como necessária intervenções com tempo de análise de 10 anos, em uma área de 8.000 metros quadrados (1 quilometro de pavimento x largura de 8 metros) e reforço estrutural de 5 centímetros de profundidade do revestimento deteriorado. Portanto, o fluxo de referência para ambos cenários será o volume de 400 metros cúbicos de revestimento repostos (8.000 m^2 de superfície x 0,05 m de espessura de mistura asfáltica).

- Sistema

Como não se trata de uma ACV completa, o processo de restauração do pavimento foi dividido em quatro atividades distintas para os dois cenários analisados, são elas: produção dos materiais, transporte de maquinários e materiais, restauração e transporte de resíduos para

aterro. É importante destacar que esse recorte do sistema foi possível em função (a) do caráter comparativo da ACV e (b) das diferenças típicas nas fases analisadas estarem contidas nessa delimitação, como se pode observar no esquema apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Sistemas dos dois cenários sugeridos, sendo (a) cenário convencional, e (b) cenário com reciclagem

- **Fronteiras do sistema de produto**

As fronteiras dos sistemas são definidas por um processo de corte, ou seja, pela delimitação de quais fases, serviços e materiais devem ser considerados ou não. Essa análise pode ser feita analisando-se o percentual de massa de cada material empregado no processo. De acordo com esse conceito, para esta ACV, todo insumo que apresentou quantidade menor ou igual a 0,5% do somatório de todos os insumos da produção principal foi desconsiderado.

- **Procedimento de alocação**

Por se tratar de um sistema que contém um processo de reciclagem, fez-se necessário adotar um método de alocação dos impactos ambientais potenciais do material reciclado. O

método de alocação por valor de massa foi selecionado, visto que é o mais comumente utilizado em estudos de ACV, e os resultados se mantêm ao longo do tempo, ao contrário da alocação econômica, cujos resultados são alterados com as mudanças de valores do mercado.

Para o cenário com RPA, foi adicionada uma restauração convencional anterior à de análise nesta pesquisa, com fluxo de material entre as atividades de restauração, como se pode também se observar no esquema da Figura 16.

A única atividade que sofreu alocação foi a de produção dos materiais, já que esta foi a atividade com interferência direta na produção da mistura asfáltica com o RPA. As atividades de transporte não sofreram alocação, visto que suas atividades não contribuíram para a produção deste material reutilizado.

- Requisitos dos dados

Para este estudo, os dados de entrada requeridos para o inventário de ciclo de vida (ICV) foram exclusivamente dados secundários, que foram coletados do software *GaBi*, do banco de dados *USLCI* e do software *PavementLCA*.

- Categorias de impactos ambientais selecionadas e método para AICV

As categorias de impacto analisadas neste estudo foram: acidificação, aquecimento global, eutrofização, ecotoxicidade, toxicidade humana do solo, toxicidade humana da água, toxicidade humana do ar, formação fotoquímica de ozônio troposférico, eutrofização e depleção da camada de ozônio. Todas essas categorias são consideradas pelo método do EDIP de 1997.

Para o caso do *PavementLCA*, com dados provenientes do *TRACI*, as categorias de impacto selecionadas foram somente a acidificação e o aquecimento global, por serem as únicas possíveis de serem comparadas com os impactos potenciais do método EDIP.

Em todas as análises foi também avaliado o consumo de energia.

- Pressupostos

Esse estudo avalia os impactos ambientais potenciais de duas estratégias de manutenção e reabilitação (M&R), considerando as fases (i) de produção de materiais, (ii) de operações de transporte ao local da obra e a local de descarte (aterro) e (iii) de produção do revestimento, compreendidas no procedimento de reforço estrutural do revestimento com mistura asfáltica convencional e com material reciclado.

Materiais, equipamentos e procedimentos

A fim de elencar as atividades envolvidas no processo de restauração, foram consultadas as especificações de serviços de pavimentos flexíveis, relacionadas a concreto asfáltico e reciclagem de concreto asfáltico a quente no local (DNIT 031/2004-ES e 034/2005-ES) e à fresagem a frio (DNIT 159/2011-ES). Assim, foram selecionados os materiais, equipamentos e procedimentos de execução para os dois tipos de restaurações, e são apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Para diferenciar os processos dos dois cenários (apresentados na Figura 16), as atividades relacionadas à “restauração” foram distribuídas entre dois elementos do sistema (equipamentos e procedimentos). Para o cenário com a mistura convencional, em equipamentos (Tabela 8), foi incluída “usina para misturas asfálticas” e, em procedimentos (Tabela 9), foram incluídos: aquecimento de materiais, produção de mistura e transporte.

Para o cenário da mistura asfáltica com RPA, as atividades são relativamente mais simples devido à usinagem acontecer no local, por isso, foi complementado ao procedimento “distribuição” a fase de produção da mistura (Tabela 9).

As hipóteses adotadas resultaram na reformulação dos processos/atividades contidos no sistema, implicando em mudanças nas respostas das avaliações, isto é, os resultados das AICV são apresentados em três categorias: produção de materiais e mistura, transporte para o local de restauro e transporte para o aterro.

Tabela 7 - Materiais necessários para o reforço estrutural

Mistura asfáltica convencional	Mistura asfáltica com RPA
Ligante asfáltico	Ligante asfáltico adicional
Agregado adicional (gráúdo e miúdo)	Agregado adicional (gráúdo e miúdo)
Material de enchimento (filer)	Material de enchimento (fíler)
	Agente de reciclagem – rejuvenescedor
	RPA

Tabela 8 - Equipamentos necessários para as duas soluções de reforço estrutural

Mistura asfáltica convencional	Mistura asfáltica com RPA
Depósito para ligante asfáltico	Depósito para ligante asfáltico
Silos para agregados	Silos para agregados
Usina para misturas asfálticas	Caminhões basculantes para transporte
Caminhões basculantes para transporte	Equipamento para fresagem a frio e reciclagem
Equipamento para fresagem a frio	Equipamento para espalhamento e acabamento
Equipamento para espalhamento e acabamento	Equipamento para compactação
Equipamento para compactação	

Tabela 9 - Procedimentos necessários para o recapeamento

Mistura asfáltica convencional	Mistura asfáltica com RPA
Aquecimento do ligante e dos agregados	Fechamento da faixa ao trânsito
Produção da mistura asfáltica	Fresagem a frio
Transporte da mistura asfáltica	Pintura de ligação
Fechamento da faixa ao trânsito	Aquecimento do ligante e dos agregados
Fresagem a frio	Produção da mistura asfáltica e Distribuição
Pintura de ligação	Compactação
Distribuição	Abertura da faixa ao trânsito
Compactação	
Abertura da faixa ao trânsito	

Com relação à porcentagem de RPA adicionada à mistura asfáltica, foram observadas as conclusões de Hong, Chen e Mikhail (2011) onde pavimentos com 35% de RPA apresentaram desempenho em longo prazo muito similar ao de pavimentos compostos por materiais virgens. Com base nas ACVs da pesquisa mencionada, foi fixado o teor de 35% de RPA para adição à mistura asfáltica, fundamentada na premissa de que a mistura convencional e a mistura com RPA apresentam o mesmo desempenho nos dois sistemas delimitados e comparados.

Já com relação aos teores de asfalto da mistura asfáltica convencional, foi adotada uma mistura do tipo concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) e, a partir dessa adoção, foi

selecionado um teor de asfalto provável de projeto de 5,5%. Por sua vez, para a mistura com RPA, foi adotado o teor de 6,5% de asfalto (asfalto reciclado mais asfalto adicional). Todos esses valores foram baseados em dados de pesquisas científicas e consultas a profissionais da área.

Estes teores de asfalto foram selecionados para delimitar não só a quantidade de asfalto (em peso) no ciclo de vida estabelecido, mas também para os cálculos necessários que resultassem no fluxo de referência de 400 metros cúbicos de mistura asfáltica das atividades de restauro. A partir dos teores de projeto, obtiveram-se as relações entre teor de asfalto e massa específica média ($G_{mbmédio}$) apresentadas na Tabela 10, considerando o basalto como o tipo de agregado.

Tabela 10 - Massa específica de misturas asfálticas em relação ao teor de asfalto (BERNUCCI et al., 2008)

Teor de asfalto (%)	5,5	6,0	6,5	7,0
$G_{mbmédio}$ (g/cm ³)	2,332	2,342	2,343	2,340

Já para calcular o valor de teor de asfalto adicional das misturas com RPA, utilizou-se a Equação 1, recomendada pelo *Asphalt Institute* (1995), que resultou num teor de asfalto adicional de 5,38%, um valor próximo do teor de ligante asfáltico para o cenário convencional (5,5%).

$$P = \frac{(100^2 - rP_2)P_1}{100(100 - P_2)} - \frac{(100 - r)P_2}{100 - P_2} \quad (1)$$

Onde:

- P = percentual de ligante novo (cimento asfáltico adicional + AR) na mistura reciclada;
- r = percentual em massa de agregado novo com relação ao agregado total da mistura reciclada;
- P1 = teor de ligante da mistura reciclada, em porcentagem;
- P2 = teor de ligante do material fresado, em porcentagem.

A esse teor de ligante asfáltico adicional destinado à mistura com RPA é incorporada uma porcentagem de agente rejuvenescedor (AR) necessária para a reciclagem do revestimento. A quantidade de AR necessária varia entre zero e 30% da quantidade de asfalto do percentual reciclado. Para este estudo, foi adotado o teor de 15% de AR, que resultou em um teor de 0,29% em relação à mistura asfáltica (total). Considerando o critério de corte da

fronteira, por se tratar de um valor menor que 0,5%, foram desconsiderados os impactos ambientais proporcionados pela produção e pela utilização do AR.

Transporte e consumo de diesel

Dentre os equipamentos necessários para a restauração com RPA, foram incluídos caminhões basculantes de capacidade específica (para alimentação da frente de restauro com RPA) e usina móvel capaz de incorporar RPA e efetuar a mistura asfáltica.

Estes equipamentos foram analisados para a quantificação dos impactos ambientais para as duas atividades de transporte: dos materiais para o local de restauração e deste local para o aterro ou bota fora. Os impactos ambientais são gerados pela produção e pelo consumo do diesel.

Três parâmetros foram necessários para os cálculos de consumo de diesel: consumo médio de combustível, capacidade dos equipamentos e distâncias percorridas. Pelas especificações técnicas da usina móvel de reciclagem da marca Wirtgen (WIRTGEN GROUP COMPANY, 2016), e pelas considerações do processo “*Truck*”, do software *GaBi*, utilizado para ambos cenários, foram obtidos os dados de consumo de diesel, apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Equipamentos necessários e suas especificações e seus consumos de diesel

Equipamento	Consumo de diesel
Caminhão basculante	38 L/100km
Usina móvel para reciclagem	37 L/h

O dado de carga máxima admissível de 22 toneladas para o caminhão basculante também foi encontrado no software *GaBi*. A carga da usina móvel não foi necessária, pois foi considerado que ela não realiza transporte de material para o local de restauração.

Foram adotados pressupostos com relação às distâncias percorridas pelos caminhões basculantes nas atividades de transporte, percorrendo 50 quilômetros para as duas atividades de transporte envolvidas no sistema. Essa distância foi adotada alinhada aos valores dos estudos de Giani et al. (2015) e Weiland e Munch (2010); além disso, foi uma tentativa de conseguir mensurar a intensidade do efeito da fase no impacto potencial, já que a fase de produção de materiais é sempre mais impactante (SANTERO; MASANET; HORVATH,

2011a). Já para o caso da usina móvel, utilizada para o processo de reciclagem do revestimento asfáltico fresado, foi considerado, que ela faça um percurso de 4 horas para alcançar o local de restauração, totalizando assim um consumo de 148 litros de diesel, esse tempo relativamente longo se deve à velocidade do percurso, que é muito baixa, em função das dimensões do equipamento.

Para ambos, caminhão basculante e usina móvel, foi contabilizado apenas o consumo de diesel de ida, desconsiderando o consumo de retorno dessas máquinas para seus pontos iniciais.

- Hipóteses simplificadoras

Pavimentos em serviço passam por diferentes atividades de restauração e podem apresentar diferentes desempenhos ao longo do tempo devido a diversos fatores, dentre eles, a configuração do tráfego, a resposta particular dos materiais, o processo de envelhecimento em longo prazo; conseqüentemente, em alguma parcela, os impactos ambientais podem ser mais intensos em alguma(s) fase(s) do ciclo de vida, em função do desempenho em serviço de um pavimento.

Devido à dificuldade de acessar o comportamento de um pavimento real em serviço e de se obter dados confiáveis de longo prazo, como os obtidos do monitoramento de um trecho experimental; para esta pesquisa, algumas premissas foram adotadas a fim de viabilizar o estudo e atingir os objetivos, a saber:

a) o estudo de caso não representa um caso real: as informações sobre o pavimento foram baseadas em dados reais e foram convenientemente confrontadas com valores e informações arbitradas, que tiveram como base pesquisa em literatura técnica, levando às configurações de projetos geométrico e de pavimento.

b) dados reais auxiliaram a atribuição de parâmetros de projetos: as informações de um projeto de duplicação de um pavimento real subsidiaram a atribuição do volume de tráfego e da classe rodovia. Este projeto norteou parâmetros para o projeto de reforço em duas configurações de recapeamento: com mistura asfáltica convencional e com material reciclado (RPA).

c) dados laboratoriais auxiliaram a atribuição de parâmetros de desempenho: para efeito de comparação, o desempenho das diferentes misturas asfálticas (convencional e com RPA) são similares. Essa inferência se fundamenta nas conclusões do estudo de Hong, Chen e Mikhail (2011). Assim, o pavimento restaurado deve atender a função atribuída com a reforço de 5 centímetros para os dois cenários.

No que se refere à ACV, também foram adotadas hipóteses simplificadoras, com o objetivo de se conseguir ter um melhor entendimento sobre a intensidade dos efeitos de variações no procedimento. Desta maneira foram focados três aspectos da ACV:

d) as fases do ciclo de vida: a literatura técnica tem indicado que as responsáveis pelos principais impactos ambientais na pavimentação são as de produção de materiais e sua aplicação *in situ*, envolvendo operações de extração e beneficiamento de matéria prima, o uso de equipamentos específicos para aplicação e transportes. Por isso, e considerando as diferenças peculiares nestas fases, este estudo focou a produção de materiais e transportes de maquinários e de resíduos para o aterro.

e) o banco de dados: diferentes fontes de dados podem mudar resultados finais, então, a hipótese de usar bancos de dados diferentes (avaliando-se segundo um mesmo método) pode mostrar tendências e o quanto um banco de dados pode ser mais indicado em situações particulares. O banco de dados do software *GaBi* oferece alguns dados aplicáveis para a realidade brasileira, isto se deve parcialmente em função da característica global da modelagem embarcada, já os banco de dados dos softwares *USLCI* e do *PavementLCA* oferecem dados mais indicados para as realidades estadunidense e o canadenses, respectivamente, em função da característica regional dos seus modelos.

f) o método de análise: o modelo do EDIP versão 1997 tem caráter global, assim, apesar de resultados mais dispersos, pode atender a características de vários locais ao mesmo tempo, incluindo o Brasil; além disso, o *GaBi* incorpora o método do EDIP 1997 nas ACV.

3.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Com a delimitação do objetivo e do escopo procedidas, pôde-se efetuar o levantamento das quantidades de materiais necessários para a produção das misturas asfálticas (convencional e com RPA). As quantidades dos materiais necessárias para produzir 400 m³ das misturas asfálticas dos dois cenários são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Massa, em quilogramas, de materiais requeridos para a mistura asfáltica convencional e com RPA

	Asfalto	AR	RPA	Agregado
Convencional	51.304	-	-	881.496
Com RPA	49.340	2.706	326.480	558.674

Com as quantidades de materiais calculadas, a especificação técnica da usina móvel (WIRTGEN GROUP COMPANY, 2016), os parâmetros encontrados no software *GaBi* e os pressupostos adotados, o consumo de diesel tanto para o transporte até o local da restauração quanto o transporte até o aterro ou bota fora se encontra na Tabela 13.

Tabela 13 - Quantidade de equipamentos e diesel consumido para as atividades de transporte

	Transporte para a restauração		Transporte para aterro	
	Quantidade de maquinário	Consumo de diesel (L)	Quantidade de maquinário	Consumo de diesel (L)
Restauração convencional: caminhões basculantes	43	817	43	817
Restauração com RPA: caminhões basculantes	36	684	28	532
Restauração com RPA: usina móvel	1	148	-	-

Os dados apresentados na Tabela 13 consideraram a capacidade do equipamento, o que não representa idealmente um caso real. Por exemplo, o número de caminhões basculantes necessários para o transporte de mistura asfáltica para o restauro foi de 43 unidades. De fato, 43 unidades é o número de viagens necessárias para o transporte do volume de mistura asfáltica até o local, o que, na prática, deve acontecer com o número da frota de veículos efetiva da empresa.

Assim sendo, dependendo do número de veículos disponíveis, essa distribuição de mercadoria pode ser feita com um maior ou menor número de viagens, devendo ser considerado o retorno do veículo para a usina para realização do reabastecimento da mercadoria, o que levaria a um consumo de combustível (extra) para o retorno. Neste estudo, portanto, para reduzir uma “contaminação” dos resultados de consumo de diesel, dado pelo retorno para a usina e distribuição relativa à capacidade produtiva da usina, foi adotada a hipótese de que a entrega do material foi realizada independentemente do tamanho da frota e sem considerar o retorno para reabastecimento.

3.2.1.1 Dados coletados no software *GaBi*

Os dados obtidos do banco do software *GaBi* (extensão obtida pela licença de estudante), se relacionam à uma série de impactos produzidos por uma atividade específica numa dada localidade. Por exemplo, no processo denominado “*Truck*”, a variável de entrada é o consumo de combustível e as variáveis de saída são: o(s) tipo(s) e quantidade(s) de emissões de poluentes geradas na combustão do combustível. Esses dados são calculados para um veículo típico que, no caso, foram geradas para um veículo típico brasileiro (localidade).

Na Tabela 14 estão apresentados alguns dos processos empregados na avaliação do inventário do ciclo de vida, nela se pode observar que o processo de produtivo de agregado pétreo “*crushed stone*” teve como base o modo de operação alemão (localidade). De certa forma, o local tomado como referência pode levar a alguma distorção dos resultados, por exemplo, se a produção é “mais limpa” os impactos ambientais resultantes são menores. O resultado detalhado do inventário coletado pelo software *GaBi* não foi disponibilizado neste trabalho devido ao compromisso de confidencialidade que o software *GaBi*.

Tabela 14 - Processos fornecidos pelo banco de dados *GaBi* utilizados para a ACV

Processo	Localidade	Breve descrição
“ <i>Bitumen, at refinery</i> ” e “ <i>Diesel, at refinery</i> ”	Brasil	O conjunto de dados cobre toda a cadeia de suprimentos dos produtos da refinaria. Isto inclui a perfuração de poços, a produção e processamento de petróleo bruto, bem como o transporte de petróleo bruto através de gasodutos.
“ <i>Crushed Stone</i> ”	Alemanha	Inclui os impactos causados pela retirada dos blocos de pedra de calcário na pedreira, o processo de moagem do material e sua passagem pelas peneiras de vibração utilizadas para a classificação dos tamanhos do material.
“ <i>Truck</i> ”	Global	Caminhão como veículo pesado ou leve para transporte rodoviário. O input é o consumo de diesel e o output, tipo de quantidade de emissões da combustão.

3.2.1.2 Dados coletados no software *USLCI*

Por sua vez, os processos coletados do software *USLCI* e utilizados neste estudo de ACV encontram-se na Tabela 15. Todos os processos pelo *USLCI* são desenvolvidos considerando a realidade norte-americana. O que deve trazer algum tipo de distorção de resultados (já mencionada) porque o modo de operação é diferente para diferentes locais.

O resultado em detalhe do inventário coletado pelo *USLCI* pode ser encontrado na íntegra no Anexo deste trabalho.

Comparando o resumo dos processos utilizados, apresentados na Tabela 14 e na Tabela 15, é possível observar que as descrições destes processos são similares nestes dois bancos de dados diferentes, porém, a recíproca para consumo e impactos ambientais pode não ser verdadeira.

No banco de dados do *USLCI*, o processo “*Petroleum, at refinery*” equivale aos processos “*Bitumen, at refinery*” e “*Diesel, at refinery*”, com a diferença que os impactos ambientais causados pela produção do petróleo já se encontra repartido para os dois produtos de refinaria, diferentemente do caso utilizando dados do *GaBi* (Tabela 14), que tal repartição teve que ser feita para este presente trabalho.

Tabela 15 - Processos fornecidos pelo banco de dados *USLCI* utilizados para a ACV

Processo	Breve descrição
“ <i>Petroleum, at refinery</i> ”	Este módulo expressa dados com base em 1 quilograma de produto de refinaria geral, bem como dados alocados para produtos de refinaria específicos. Os dados são atribuídos a produtos de refinaria específicos com base na percentagem em massa de cada produto na produção da refinaria. Os produtos da refinaria incluem “ <i>Bitumen, at refinery</i> ” e “ <i>Diesel, at refinery</i> ”.
“ <i>Limestone, at mine</i> ”	O processo de extração de calcário inclui a extração em poços abertos por jateamento, seguido de britagem mecânica e triagem.
“ <i>Transport, single unit truck, diesel powered</i> ”	Transporte de cargas em geral, tendo Input como o consumo de diesel e Outputs as emissões deste consumo.

Os processos selecionados para o material agregado, apesar de parecerem diferentes devido aos seus nomes, são também coerentes entre eles, já que ambos consideram os impactos ambientais causados pela produção deste material pelo uso de pedreiras de calcário.

3.2.1.3 Dados coletados no software *PavementLCA*

O software do *PavementLCA* utiliza dados do Instituto Athena e do *SimaPro*, porém não expõe tais dados para o usuário. Mesmo assim, foi realizada a ACV neste software,

utilizando como auxiliares o manual do *PavementLCA* e os vídeos educativos de seu site (ATHENA INSTITUTE, 2013).

Alguns dados de projeto do pavimento são requeridos, inclusive dados de tráfego durante o uso do pavimento, caso essa fase seja considerada na ACV, entretanto, não é possível obter dados referentes à dosagens da mistura e aos materiais. No *PavementLCA*, é possível apenas selecionar materiais pré-definidos e codificados, porém, não foi encontrada a descrição dos processos e materiais representados por esses códigos.

Na Tabela 16, estão apresentadas as atividades principais tomadas para a realização da ACV pelo *PavementLCA*. Para a mistura asfáltica convencional foram consideradas as atividades contidas nos processos *Mill Asphalt Pavement* (fresagem) e *Asphalt Paving HMA* (mistura asfáltica a quente). Já para a mistura com RPA, os processos considerados foram: *Mill Asphalt Pavement* e *Hot In-Place Recycling* (reciclagem a quente no local).

Tabela 16 - Considerações tomadas para a utilização do programa *PavementLCA*

Atividade	Material	Espessura
<i>Asphalt Paving HMA</i>	HMA PG-64-22	50,0 mm
<i>Mill Asphalt Pavement</i>	HMA PG-64-22	50,0 mm
<i>Hot In Place Recycling</i>	HMA PG-64-22	32,5 mm

As espessuras apresentadas na Tabela 16 têm como base os resultados de um cálculo de reforço estrutural (DNER PRO 269). Vale destacar que o *PavementLCA* não permite a consideração de nenhum método de alocação (mesmo havendo reciclagem de material), sendo assim, nesta ACV, não foi feita nenhuma consideração de repartição para o processo de restauro com mistura asfáltica com RPA. Por isso, como artifício de simplificação, a espessura de mistura com RPA foi de 32,5 mm “*Hot In Place Recycling*” (reciclagem a quente no local) pois é a quantidade de mistura asfáltica desconsiderando a taxa de 35% de RPA. Infelizmente, neste caso, a falta de acesso à descrição dos processos pode trazer alguma distorção de efeitos, uma vez que a solução-artifício pode redundar com alguma consideração do banco de dados relacionados ao processo de reciclagem a quente no local.

Este estudo de caso foi delineado a fim de trazer respostas sobre os impactos de diferentes técnicas restauro de um pavimento, empregando-se a ACV, por isso, os recortes e

hipóteses simplificadoras tiveram de ser aplicados. Essas hipóteses simplificadoras adotadas tem base técnica e ao mesmo tempo atende à transparência requerida pela técnica da ACV.

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Desenvolvidos o objetivo, o escopo e a avaliação do inventário, foi possível identificar e quantificar os impactos potenciais produzidos pelas fases de produção de materiais e transportes de maquinário e para o aterro. Foram apresentados os impactos potenciais que apresentaram maior intensidade de ocorrência.

Para proceder à análise dos resultados, primeiramente, foram tomados os resultados considerando os impactos potenciais produzidos pelos dois tipos de restauro isoladamente, elencando os de maior intensidade de ocorrência. Num segundo momento, foi analisado o ganho ambiental do uso da mistura asfáltica com RPA, calculando-se o valor percentual da diferença entre o impacto potencial da mistura com RPA e o da mistura convencional. O ganho ambiental é representado por um percentual obtido da relação entre a diferença dos impactos calculados para as duas técnicas de restauro ($IPOT_{HMA} - IPOT_{RPA}$) e o impacto calculado pela técnica convencional ($IPOT_{HMA}$).

Finalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade, que consiste da comparação de resultados diferentes em razão de mudanças na ACV. Para que fosse possível analisar criticamente a sensibilidade dos resultados devido a mudanças nas fontes de dados, foi realizada a comparação entre os resultados do *GaBi* e do *USLCI*. Os resultados do *PavementLCA* não foram comparados com os outros dois outros devido a diferenças de fontes de dados e de método de análise ao mesmo tempo.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 IMPACTOS POTENCIAIS: DADOS DO *GaBi* e MÉTODO EDIP

Os impactos potenciais encontrados utilizando os dados do *GaBi* e o método EDIP 1997, em valores absolutos, apresentados Tabela 17, são relacionados ao fluxo de referência de 400 metros cúbicos de mistura asfáltica reposta. Os dados obtidos do software *GaBi* não foram apresentados devido ao critério de sigilo de informações da licença estudantil.

Na Tabela 17, observam-se os resultados de cada aspecto ambiental das atividades do sistema proposto para o cenário convencional e cenário com RPA. Para as atividades de “Produção de materiais” e de “Transporte para aterro” todos os valores para o cenário com RPA são menores quando comparados com o cenário convencional, diferentemente da atividade de “Transporte para local de restauração”, onde, causado pelo uso da usina móvel, os valores são maiores para o cenário com RPA (valores percentuais negativos).

Apesar dos impactos ambientais potenciais e do consumo de energia serem maiores para a atividade “Transporte para local de restauração” no cenário com RPA, o resultado de valores totais das outras atividades do sistema se mostraram mais vantajosas, mostrando ganhos ambientais em torno de 4 e 10%.

Tabela 17 – Impacto potenciais da AICV, em valores absolutos, utilizando os dados do GaBi

Atividade	Impacto Potencial	Convencional	Com RPA	Diferença entre cenários
Produção de materiais	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,80E+02	1,69E+02	5,73%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,32E+04	1,20E+04	9,19%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	2,91E+04	2,66E+04	8,66%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	1,53E+10	1,46E+10	4,44%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	1,87E+04	1,81E+04	2,95%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	6,21E+05	5,96E+05	3,92%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	1,98E+01	1,91E+01	3,85%
	Consumo de energia (MJ)	5,76E+04	5,50E+04	4,49%
Transporte para local de restauração	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,41E+01	1,22E+01	13,58%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,59E+02	1,60E+02	-0,54%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	2,39E+03	2,03E+03	15,06%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	3,36E+08	3,18E+08	5,30%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	3,39E+02	3,33E+02	1,87%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	9,25E+03	9,39E+03	-1,52%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	4,00E-01	3,86E-01	3,35%
	Consumo de energia (MJ)	7,80E+02	1,22E+01	13,58%
Transporte para aterro	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,41E+01	9,17E+00	34,83%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,59E+02	1,03E+02	34,93%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	2,39E+03	1,56E+03	34,70%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	3,36E+08	2,19E+08	34,85%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	3,39E+02	2,21E+02	34,97%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	9,25E+03	6,03E+03	34,81%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	4,00E-01	2,61E-01	34,73%
	Consumo de energia (MJ)	7,80E+02	5,08E+02	34,84%
Total	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	2,08E+02	1,91E+02	8,24%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,35E+04	1,22E+04	9,38%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	3,39E+04	3,02E+04	10,95%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	1,60E+10	1,52E+10	5,10%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	1,94E+04	1,87E+04	3,50%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	6,39E+05	6,12E+05	4,28%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	2,06E+01	1,97E+01	4,44%
	Consumo de energia (MJ)	5,92E+04	1,91E+02	8,24%

4.2 IMPACTOS POTENCIAIS: DADOS DO *USLCI* e MÉTODO EDIP

Na Tabela 18 são apresentados os impactos potenciais da ACV estudada, em valores absolutos, utilizando os dados do banco de dados *USLCI*, também utilizando para os cálculos o método EDIP 1997. Os valores encontrados são relacionados ao fluxo de referência de 400 metros cúbicos de revestimento reposto. Os aspectos ambientais potenciais analisados são os mesmos utilizados para a análise feita com os dados do software *GaBi*. Os dados retirados do banco de dados *USLCI* e o memorial de cálculos se encontram no Anexo 2. Os resultados

apresentados na Tabela 18 mostraram que as atividades de “Produção de materiais” e de “Transporte para aterro” apresentam ganhos ambientais para todos os aspectos analisados, ao contrário da atividade “Transporte para aterro”. Os ganhos ambientais para a análise dos totais de cada aspecto variam, em geral, de 4% e 14%.

Tabela 18 - Valores absolutos encontrados na AICV utilizando os dados do USLCI

Atividade	Impacto Potencial	Convencional	Com RPA	Diferença entre cenários
Produção de materiais	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	7,58E+02	7,29E+02	3,83%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	5,39E+03	5,18E+03	3,83%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	1,52E+03	1,46E+03	3,83%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	2,04E+10	1,96E+10	3,83%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	2,35E+04	2,26E+04	3,83%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	1,53E+05	1,47E+05	3,83%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	2,41E+01	2,32E+01	3,83%
	Consumo de energia (MJ)	2,01E+02	1,93E+02	4,11%
Transporte para local de restauração	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,38E+01	1,15E+01	16,28%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,27E+01	1,06E+01	16,28%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	2,41E+03	2,02E+03	16,28%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	1,95E+08	1,64E+08	16,28%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	1,05E+02	8,81E+01	16,28%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	3,60E+02	3,02E+02	16,28%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	6,67E-01	5,58E-01	16,28%
	Consumo de energia (MJ)	4,64E+02	3,88E+02	16,28%
Transporte para aterro	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	1,38E+01	8,95E+00	34,88%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	1,27E+01	8,25E+00	34,88%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	2,41E+03	1,57E+03	34,88%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	1,95E+08	1,27E+08	34,88%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	1,05E+02	6,85E+01	34,88%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	3,60E+02	2,35E+02	34,88%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	6,67E-01	4,34E-01	34,88%
	Consumo de energia (MJ)	4,64E+02	3,02E+02	34,88%
Total	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	7,86E+02	7,50E+02	4,59%
	Ecotoxicidade (m ³ de solo)	5,41E+03	5,20E+03	3,93%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	6,33E+03	5,04E+03	20,37%
	Toxicidade do ar (m ³ de ar)	2,08E+10	1,99E+10	4,24%
	Toxicidade do solo (m ³ de solo)	2,37E+04	2,27E+04	4,02%
	Toxicidade da água (m ³ de água)	1,54E+05	1,48E+05	3,93%
	Form. Fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	2,54E+01	2,42E+01	4,97%
	Consumo de energia (MJ)	1,13E+03	8,83E+02	21,76%

Entretanto, diferentemente dos resultados encontrados utilizando dados do software *GaBi*, as diferenças percentuais dos impactos ambientais potenciais não variam entre os cenários convencional e com RPA. Por exemplo, a atividade “Produção de materiais” apresenta mudança de 3,83% em todos os impactos ambientais potenciais. Isso ocorre devido aos dados a uma particularidade do banco de dados *USLCI*. Os processos “*Limestone, at mine*” e “*Transport, single unit truck, diesel powered*”, apresentam poucos dados que influenciam nos impactos ambientais potenciais, fazendo com que os resultados e, consequentemente, as diferenças percentuais entre os diferentes cenários, dependam quase inteiramente dos processos “*Bitumen, at refinery*” e “*Diesel, at refinery*”.

4.3 IMPACTOS POTENCIAIS: COMPARAÇÃO ENTRE *GaBi* E *USLCI*

4.3.1 Potencial de Acidificação

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos de potencial de acidificação, expresso em SO₂ eq., para as atividades de Produção de materiais, Transporte para local de restauração e Transporte para aterro. São também apresentados os valores de “Total” das atividades.

Figura 16 – Impacto potencial de acidificação, em kg SO₂eq., com dados do *GaBi* e do *USLCI*

Na análise do potencial de acidificação, feita em quilogramas de SO₂ equivalente, observa-se em ambos os resultados, com dados do *GaBi* e com dados do *USLCI*, que a atividade de produção de materiais apresenta-se como a atividade mais crítica com relação à

geração do impacto. As duas atividades de transporte, por sua vez, pouco contribuem para o potencial de acidificação com relação ao total, principalmente na análise feita com os dados do *USLCI*.

Nos dois resultados também se observa que a estratégia de restauração com RPA apresentou menor potencial de acidificação, e os valores absolutos deste impacto ambiental potencial analisado para as atividades de transporte são similares, todos apresentando valores entre $8,95E+00$ (transporte para aterro com RPA com dados do *USLCI*), e $1,41E+01$ (transportes convencional com dados do *USLCI*), porém apresentam valores muito discrepantes para a atividade de produção de materiais, sendo os valores com os dados do *USLCI* mais de quatro vezes maiores comparado com os valores obtidos com os dados do *GaBi*.

4.3.2 Potencial de ecotoxicidade

Na Figura 17 são apresentados os resultados do impacto potencial de ecotoxicidade do solo, expresso em metros cúbicos de solo.

Figura 17 - Impacto potencial de ecotoxicidade, em m³ de solo, com dados do *GaBi* e do *USLCI*

Para esta análise, observa-se que os dois resultados (*GaBi* e *USLCI*) também apontam que a atividade de “Produção de materiais” é a atividade que mais contribuiu para o impacto potencial de ecotoxicidade. Ambas as análises mostram que a restauração com 35% de RPA incorporada na mistura asfáltica é a estratégia que gera menos impacto ambiental de ecotoxicidade.

A atividade de produção de materiais é a atividade com maior geração deste impacto ambiental potencial, e novamente os dados absolutos desta atividade mostram considerável diferença quando comparados os resultados obtidos com os dados do *GaBi* e os do *USLCI*, sendo a diferença percentual do total para a atividade convencional de 60%, e para a atividade com RPA de 58%, respectivamente.

4.3.3 Potencial de aquecimento global

O impacto ambiental potencial analisado a seguir é o de aquecimento global, expresso em quilogramas de gás carbônico equivalente (kg CO₂eq.), e é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Impacto potencial de aquecimento global, em kg CO₂eq., com dados do *GaBi* e do *USLCI*

Diferentemente dos resultados apresentados anteriormente (Figuras 17 e 18), os resultados de potencial de aquecimento global, utilizando os dados do *USLCI*, apresentados na Figura 19, se apresentam diferentes da tendência que vinha sendo encontrada, e as atividades de transporte para local de restauração e transporte para aterro, neste caso, são mais impactantes quando comparadas com a atividade de produção de materiais, mostrando que a fonte de dados pode causar grandes alterações nos resultados. Para a análise com os dados do *GaBi*, os resultados seguem a tendência que vinha sendo encontrada de maior geração de impacto ambiental na atividade de produção de materiais e reduzido impacto ambiental nas duas atividades de transporte.

O impacto de aquecimento global para a atividade de transporte para o local de restauração, para ambos os resultados, é maior para a estratégia de restauração com o uso do RPA, já que para esta estratégia é necessário o uso da usina móvel, que demanda grande consumo de diesel. Entretanto os valores totais de potencial de aquecimento global são menores para o cenário com restauração utilizando RPA para ambas as análises de diferentes fontes de dados, sendo a diferença percentual do total com os dados do *USLCI* de 20%, e com os dados do *GaBi* de 10%.

4.3.4 Potencial de toxicidade humana do ar

Na Figura 19, são apresentados os gráficos obtidos para o impacto potencial de toxicidade do ar, expressos em metros cúbicos de ar. Estes gráficos apresentam a mesma tendência observada nas análises anteriores, onde a atividade de produção de materiais se apresenta como a atividade mais impactante, contribuindo quase totalmente para os valores absolutos totais de toxicidade humana do ar. Também é possível observar que este impacto ambiental potencial é reduzido quando utilizado 35% de RPA na mistura asfáltica.

A diferença entre as duas análises, feitas cada uma com dados de fontes diferentes, é relativamente pequena quando comparada com os resultados obtidos dos outros impactos ambientais potenciais, sendo a diferença entre os resultados totais com os dados do *GaBi* e com os dados do *USLCI* de, em média, 30% menor para a estratégia de restauração com RPA.

Figura 19 - Impacto potencial de toxicidade humana do ar, em m³ de ar, com dados do *GaBi* e do *USLCI*

4.3.5 Potencial de toxicidade humana do solo

A Figura 20 apresenta o potencial de toxicidade humana do solo, expressa em metros cúbicos de solo.

Figura 20 - Impacto potencial de toxicidade humana do solo, em m³ de solo, com dados do *GaBi* e do *USLCI*

Nela se pode identificar a mesma tendência da análise de toxicidade humana do ar. Para o impacto potencial de toxicidade humana do solo, a diferença dos valores absolutos totais para ambas as estratégias de restauração é ainda menor, sendo de 4% a diferença percentual entre os valores totais das diferentes estratégias de restauração com dados do *USLCI* e 3% para o mesmo tipo de comparação com dados do *GaBi*.

4.3.6 Potencial de toxicidade humana da água

Para a análise de toxicidade humana da água, os gráficos obtidos se encontram na Figura 21, onde a unidade é expressa por metros cúbicos de água.

Figura 21 - Impacto potencial de toxicidade humana da água, em m³ de água, com dados do *GaBi* e do *USLCI*

Os dois gráficos gerados para a análise de toxicidade humana da água apresentam a mesma tendência, ou seja, a atividade de produção de materiais é a atividade que mais gera o impacto ambiental potencial, sendo sua contribuição quase que integral para os valores totais desta categoria de impacto. Os dois gráficos também mostram um ganho ambiental de aproximadamente 4%, para ambas as análises com diferentes fontes de dados, quando a estratégia de restauração utiliza RPA na mistura asfáltica, entretanto os valores absolutos das duas análises são consideravelmente diferentes entre si, diferindo em mais de quatro vezes a diferença entre os valores obtidos com os dados do *USLCI* e com os dados do *GaBi*.

4.3.7 Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico

A análise desta categoria de impacto para as AICVs desenvolvidas com o EDIP 1997 se encontra na Figura 22, mostrando os resultados de potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico, expresso em quilograma de etileno (C_2H_4) equivalente.

Figura 22 – Impacto potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico, em kg C_2H_4 eq., com dados do *GaBi* e do *USLCI*

No caso da análise de formação fotoquímica de ozônio troposférico, a tendência observada é semelhante às análises anteriormente feitas, onde a produção de materiais é a atividade com maior geração do impacto analisado e onde o somatório dos impactos das três atividades apresenta ganho ambiental de 4%, para ambos os resultados de diferentes bancos de dados, para o cenário de restauração com RPA. No caso desta categoria de impacto da Figura 23 os valores absolutos das duas análises são próximos, sendo os resultados que utilizam dos dados do *USLCI* apresentando apenas 23% de diferença quando comparados com os resultados obtidos com os dados do *GaBi*.

4.3.8 Consumo de energia

Embora o consumo de energia não seja um impacto potencial direto, mas sim um aspecto ambiental, ele também foi contabilizado, pois há custos ambientais e econômicos envolvidos na sua geração. Estes valores de consumo de energia para as duas análises feitas com diferentes fontes de dados são encontrados na Figura 23.

Figura 23 - Resultados de potencial de consumo de energia, em MJ, com dados do *GaBi* e com dados do *USLCI*

Assim como no caso da análise do impacto potencial de aquecimento global, o resultado de consumo de energia na análise utilizando os dados do *USLCI* não apresenta a tendência clara, ou seja, os resultados das atividades de transporte apresentam alta contribuição no consumo de energia, sendo maior que os valores de consumo de energia na atividade de produção de materiais.

Os resultados encontrados utilizando os dados do software *GaBi*, por outro lado, mostram as mesmas observações apontadas para maioria dos resultados encontrados anteriormente: baixa contribuição das atividades de transporte para os valores de consumo de energia total.

Ambas as análises mostram economia no consumo de energia para o cenário que utiliza RPA na mistura asfáltica, mas ainda tem como principal atividade impactante a

produção de materiais. O ganho ambiental é relativamente discreto, contudo, não deve ser negligenciado.

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi feita a comparação percentual entre as diferenças de resultados entre os cenários convencional e com RPA, para ambas as análises realizadas com dados do software *GaBi* e do banco de dados do *USLCI*. Esta comparação é feita a partir dos percentuais de ganho ambiental de cada categoria de impacto, ou seja, quanto do impacto ambiental potencial e de consumo de energia foi reduzido devido ao uso de RPA na mistura asfáltica. Esta comparação é apresentada na Figura 24, onde a sigla “AC” representa potencial de acidificação, “ET” representa potencial de ecotoxicidade, “AG” representa potencial de aquecimento global, “TR” representa potencial de toxicidade humana do ar, “TS” representa potencial de toxicidade humana do solo, “TG” representa potencial de toxicidade humana da água, “FF” representa potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico e “EN” representa potencial de consumo de energia.

Figura 24 – Ganho ambiental dos aspectos ambientais da restauração com RPA.

Para os resultados com dados do *USLCI*, observa-se que, os ganhos ambientais na maioria das categorias de impacto são próximos entre si, ou seja, impactos ambientais

mostram ganhos ambientais de aproximadamente 4%, com exceção aos casos de aquecimento global (AG) e consumo de energia (EN) que apresentam ganhos de cerca de 20% e 21%, respectivamente. Nestes dois casos, os ganhos ambientais mais altos ocorrem por causa de suas atividades de transporte, que apresentam considerável geração dos aspectos ambientais. Entretanto, ressalta-se que estes altos valores de ganho ambiental são referentes a valores absolutos relativamente baixos de consumo de energia.

Já para a análise com os dados do software *GaBi*, os resultados encontrados para os diferentes aspectos ambientais são diferentes entre si, isso pode representar um efeito do detalhamento das informações dos dados do software *GaBi*. Por isso, o ganho ambiental não é simplesmente atribuído à economia de materiais, mas também a outras fases do ciclo de vida do sistema.

Das duas análises feitas com as diferentes fontes de dados, foi possível observar que o cenário da restauração com RPA apresentou sempre ganhos ambientais positivos, mostrando que esta estratégia de restauração é mais ambientalmente indicada para as atividades e condições de contorno deste estudo.

Para observar a contribuição percentual de cada uma das atividades de restauração do pavimento para cada aspecto ambiental analisado, na Figura 25 apresenta-se a contribuição relativa dos aspectos ambientais. Observa-se que, utilizando os dados do software *GaBi*, as categorias de impacto que apresentaram maior geração de impactos para as atividades de transporte são o de potencial de acidificação (AC) e o de potencial de aquecimento global (AG), que juntas apresentam contribuição de aproximadamente 14% para o cenário convencional (1) e de 12% para o cenário com RPA (2). Isso ocorre, pois os dados dos processos “*Diesel, at refinery*” e “*Truck*” (no *GaBi*), utilizados para as atividades de transporte, apresentam maior quantidade de dados de emissões de substâncias causadoras deste potencial de acidificação e potencial de aquecimento global que os dados de emissões causadoras dos outros impactos ambientais potenciais.

Outro ponto interessante de ser observado é a similaridade da contribuição entre os cenários de restauração de cada atividade para cada categoria de impacto analisada, mostrando que apesar do cenário com RPA ser ambientalmente mais vantajoso, suas diferentes atividades apresentam valores proporcionais de contribuição relativa. Esta mesma observação

pode ser feita, a partir da Figura 26, onde se utilizou os dados do *USLCI* para o cálculo da contribuição relativa dos aspectos ambientais.

Figura 25 - Contribuição relativa dos resultados de impactos potenciais e energia com os dados coletados do software *GaBi*, onde (1) é referente ao cenário convencional, e (2) referente ao cenário com RPA

Figura 26 - Contribuição relativa dos resultados de impactos potenciais e energia com os dados coletados do *USLCI*, onde (1) é referente ao cenário convencional, e (2) referente ao cenário com RPA

Diferentemente da análise feita com os dados do software *GaBi*, a análise da Figura 26 mostra que, utilizando os dados do *USLCI*, a contribuição relativa das atividades de transporte são maiores nas categorias aquecimento global e consumo de energia, sendo que a contribuição conjunta das duas atividades de transportes totalizaram 80%, em média, para o impacto de aquecimento global e de 80% para consumo de energia.

Como última análise entre as fontes de dados do *GaBi* e do *USLCI*, foi construído o gráfico da Figura 27, onde se apresentam os valores de contribuição relativa, tendo como referência os valores do cenário convencional obtidos a partir dos dados do *GaBi*. Assim, a contribuição relativa foi calculada comparando-se valores de referência dos resultados totais de cada impacto potencial com os demais valores totais.

Esta análise mostrou que os resultados foram bastante sensíveis à mudança das fontes de dados (*GaBi* e *USLCI*), ou seja, ao mudar a fonte de dados altera-se consideravelmente os resultados totais finais, para maioria das categorias de impactos analisados. As categorias mais sensíveis com relação à fonte de dados são: potencial de aquecimento global (AG), potencial de toxicidade da água (TG) e potencial de consumo de energia (EN).

Figura 27 - Comparação percentual dos impactos potenciais totais e consumo de energia total entre os cenários analisados

Apesar de as observações, em geral, levarem à conclusão de que o cenário de restauração com RPA exhibe maiores ganhos ambientais em todos os valores totais, notou-se

que a mudança na fonte dos dados pode mudar observações particulares, por exemplo, alterando o entendimento sobre quais impactos ambientais potenciais apresentaram maior ganho ambiental na mudança da estratégia de restauração.

4.5 IMPACTOS POTENCIAIS: *PavementLCA*

As avaliações efetuadas no software *PavementLCA* tiveram um recorte diferente das outras avaliações, porque muito do escopo das ACVs não foi possível de ser incorporado ao software, visto que ele não oferece a possibilidade para o usuário realizar mudanças nas considerações em seus cálculos.

Na Tabela 19, são apresentados os resultados de aquecimento global, acidificação e consumo de energia, obtidos no software *PavementLCA*. Estas categorias de impactos foram selecionadas, pois são as que apresentam possibilidade de serem comparadas com as do método EDIP 1997.

Tabela 19 – Impactos potenciais obtidos a partir do *PavementLCA*

Atividade	Categoria de Impacto Potencial	Convencional	Com RPA	Diferença entre cenários
Restauração e Manutenção	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	3,67E+02	2,38E+02	65,00%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	6,57E+04	4,27E+04	65,00%
	Consumo de Energia (MJ)	3,67E+06	2,39E+06	65,00%
Transporte	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	8,17E+01	6,59E+01	80,75%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	9,07E+03	7,32E+03	80,75%
	Consumo de Energia (MJ)	1,32E+05	1,06E+05	80,75%
Total	Acidificação (kg SO ₂ eq.)	7,48E+04	5,00E+04	66,91%
	Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	4,48E+02	3,04E+02	67,87%
	Consumo de Energia (MJ)	3,80E+06	2,49E+06	65,55%

Estes valores mostram que existe ganho ambiental para todas as categorias de impacto potencial e nas duas atividades analisadas quando a estratégia de restauração com RPA é comparada com a estratégia de restauração convencional. Consequentemente, também se observa ganho ambiental nos valores totais na ordem de 66%.

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam respectivamente os resultados, em termos absolutos, dos impactos potenciais de acidificação, aquecimento global e do aspecto ambiental de consumo de energia obtidos pelo software *PavementLCA*.

Figura 28 - Resultados obtidos pelo software *PavementLCA* de potencial de acidificação, em kg SO₂eq.

Figura 29 - Resultados obtidos pelo software *PavementLCA* de potencial de aquecimento global, em kg CO₂eq.

Figura 30 - Resultados obtidos pelo software *PavementLCA* de consumo de energia, em MJ

Todos os resultados mostram ganho ambiental para o cenário que utiliza RPA, e todos os resultados também mostram que a atividade “restauração e manutenção” é responsável por um maior impacto ambiental potencial em comparação com a atividade “transporte” (TP). Infelizmente, não é possível compreender quais as suposições e considerações que o programa realiza para a formação dos resultados, mas estes resultados mostram um alinhamento com os resultados gerais do *GaBi* e do *USLCI*.

A análise de sensibilidade não foi feita comparando os resultados obtidos do *PavementLCA* com os obtidos do *GaBi* e do *USLCI*, devido à diferença considerável apresentada no desenvolvimento da ACV.

Um ponto positivo do software *PavementLCA* é reconhecer o esforço feito por institutos e grupos de pesquisa para considerar o impacto ambiental como um elemento da tomada de decisões em projetos de pavimentos. Esse software, Apesar da pouca interação do usuário com os dados e os cálculos, esse software é uma opção canadense de oferecer aos projetistas a possibilidade de incluir uma análise ambiental em seus projetos.

5. CONCLUSÕES

A análise ambiental por meio da técnica de ACV vem ganhando visibilidade para diversos produtos e serviços pelo seu caráter quantitativo e comparativo, trazendo a possibilidade de eliminar a subjetividade muitas vezes encontrada em estudos de impactos ambientais. Tal técnica, não diferentemente, também vem sendo utilizada em estudos de infraestrutura de pavimentos em muitos países distintos, entretanto o tema ainda se encontra incipiente no Brasil.

Este trabalho visou quantificar e comparar impactos potenciais de duas estratégias distintas de restauração de pavimento asfáltico, sendo elas a restauração com mistura asfáltica convencional e outra, utilizando 35% de RPA. Foram avaliados os impactos potenciais decorrentes das fases de produção de materiais e transportes de equipamentos e para o aterro.

As avaliações foram feitas considerando dados do *GaBi* e método *EDIP*, dados do *USLCI* e método *EDIP* e dados e método do *PavementLCA*. Nos três tipos de análise realizados, os resultados indicaram a redução em todos os impactos ambientais potenciais totais em consequência do reaproveitamento do RPA.

Observou-se também que as atividades da fase de transportes tem efeito muito pequeno nos impactos potenciais, se comparada à fase produção de materiais. Os únicos impactos onde as atividades de transporte exibiram significante importância foram no potencial de aquecimento global e de consumo de energia, utilizando dados do banco de dados da *USLCI*. Não coincidentemente foram as análises que apresentaram maior porcentagem de ganho ambiental, parte justamente devido à contribuição das fases de transporte.

Na análise de sensibilidade, comparando os resultados obtidos com o software *GaBi* e com o *USLCI*, observou-se diferença considerável para alguns impactos ambientais potenciais. Conclui-se que esta diferença é consequência da fonte de dados, pois o escopo das duas análises é o mesmo e o método de AICV utilizado também (WENZEL et al. , 1997). Os resultados das atividades de transporte são mais sensíveis à mudança dos dados utilizados quando comparados com os valores da produção de materiais.

Existem diferenças importantes nos dados coletados entre os bancos de dados do *GaBi* e do *USLCI*. Com o estudo realizado, foi possível observar que os dados do *GaBi* são mais complexos, trazendo resultados mais precisos. Para o caso de ACVs realizadas no Brasil, o *GaBi* também se mostra mais vantajoso no quesito qualidade de dados, visto que ele contém dados brasileiros e dados globais, diferentemente dos outros bancos de dados, que apresentam apenas dados norte-americanos e canadenses.

A vantagem de ter realizado a ACV a partir do banco de dados do *USLCI*, sem a ajuda de nenhum programa facilitador para a fase de AICV, como o *GaBi* oferece, é seu caráter didático de compreender como é feita a relação entre os dados e os fatores de equivalência do método de AICV, neste caso o EDIP, entretanto, como este processo é extenso e trabalhoso, o risco de haver erros nos cálculos é maior quando comparado com o processo automatizado realizado em programas como o *GaBi*. Deve-se lembrar que o banco de dados da *USLCI* não oferece dados oficiais, o que pode trazer questionamentos sobre a qualidade dos dados e, consequentemente, dos resultados.

Para o caso do *PavementLCA*, não foi possível analisar os dados que o programa utiliza, pois eles não estão acessíveis para o usuário. Este programa mostra-se simples, oferecendo facilidade para aplicar a ACV em projetos de pavimentação, entretanto, é uma ferramenta fechada, podendo comprometer a transparência do processo e a compreensão dos resultados com clareza.

Com o desenvolvimento deste trabalho, analisados e quantificados os impactos ambientais potenciais, pode-se recomendar a utilização de RPA em misturas asfálticas devido ao ganho ambiental que esta estratégia de restauração proporciona, mesmo com a desvantagem ambiental de necessitar da usina móvel.

Salienta-se que as conclusões aqui apresentadas representam apenas o aspecto ambiental de um projeto fictício de reforço estrutural de um pavimento asfáltico, por isso,

suas conclusões não devem ser generalizadas. A análise econômica e uma análise mais detalhada de desempenho do pavimento são imprescindíveis para um bom projeto, entretanto espera-se que estes não sejam os únicos fatores analisados e que os impactos ambientais também sejam considerados.

Mais do que incentivar o uso de RPA para estratégias de restauração, este trabalho teve como objetivo introduzir o uso da técnica de ACV para a área de infraestrutura de transportes no Brasil. Este tipo de estudo ainda está ganhando maturidade em diferentes países, alguns com maior desenvolvimento sobre o tema que outros.

A ACV ainda precisa ser melhor desenvolvida e compreendida para a área na pavimentação. São várias as fontes de imprecisão relacionadas à técnica, tais como a dificuldade de englobar o ciclo de vida completo do pavimento, os pressupostos necessários, a aplicação de uma alocação adequada dos impactos ambientais potenciais e a qualidade dos dados. Porém, apesar dos aspectos de imprecisão dos estudos com a técnica, a ACV pode trazer uma compreensão melhor sobre os fluxos que ocorrem no ciclo de vida do pavimento e um entendimento dos impactos ambientais gerados por ele. Por isso é necessário estudo e dedicação para que esta técnica na área de pavimentação seja padronizada e seus resultados cada vez mais precisos.

Por fim, para pesquisas futuras recomenda-se contato direto com concessionárias rodoviárias e com projetos de pavimentação reais, assim é possível delimitar com maior precisão o processo de produção completo do pavimento. Seria interessante também participar do processo de restauração no local, possibilitando não apenas a obtenção de dados mais fiéis à realidade do processo, como também seria possível obter, com o auxílio de aparelhos medidores, as emissões que o maquinário emite, obtendo assim dados primários.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a.

_____. **ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações** Rio de Janeiro Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

_____. **ABNT NBR ISO/TR 14049 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b.

ARAÚJO, J. P.; OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D. **Sustainability Comparison Between Pavement With Conventional and Recycled Hot Mix Asphalt**^{4º} International Conference on Engineering of Waste and Biomass Valorisation. Anais. Porto, 2012.

_____. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 32, p. 97–110, 2014.

ATHENA INSTITUTE. **Impact Estimator for Highways : User Guide**. Disponível em: <www.pavementlca.com>, 2013.

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; AMOR, M. BEN. **Life cycle assessment of pavements: Reviewing research challenges and opportunities**. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 2187–2197, 2015.

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

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

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3ª edição ed. Fazendo Arte Editora. São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER: Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER-PRO 269/94: Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-PRO 011/79. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/04-ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 034/2005 - ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço**, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **DNIT 159/2011: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço**, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **DNIT: Manual De Restauração De Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

CABRAL, L. DO N.; PEREIRA, S. S.; ALVES, T. L. B. **Degradação ambiental e implicação para a saúde humana decorrentes da mineração: o caso dos trabalhadores de uma pedreira no município de Campina Grande/PB**. Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. 8, n. 15, p. 104–118, 2012.

CHEHEBE, J. R. **Análise de ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 1998.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.; VENTURA, A. **LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete**. Resources, Conservation and Recycling, v. 54, n. 12, p. 1231–1240, 2010.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.

CORMIER, B.; THÉBEAU, D. **Processus d'élaboration de l'orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées de transports Québec**. Congrès annuel de l'association de transports du Canada á St-John's, p. 20, 2003.

D' AGOSTO, M. DE A. **Transporte, Uso de Energia e Impactos Ambientais: Uma abordagem introdutória**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

D'AGOSTO, M. DE A.; OLIVEIRA, C. M.; ASSUMPÇÃO, F. DO C. **Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV)**. Revista Transportes, p. 76–97, 2014.

FERNANDES JR, J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. **Defeitos e atividades de manutenção e reabilitação em pavimentos asfálticos**. São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2011.

FOGLIATTI, M. C.; FILIPPO, S.; GOUDARD, B. **Avaliação De Impactos Ambientais: Aplicação aos Sistemas de Transporte**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; VIEIRA, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **SimaPro Tutorial**, São Francisco, 2016.

HAAS, R. C.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern pavement management**. p. 583. Krieger Publishing Co. Malamar, Florida, 1994.

HÄKKINEN, T.; MÄKELÄ, K. **Environmental Adaption of Concrete -Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements**. Technical Research Centre of Finland, 1996.

HARVEY, J.; KENDALL, A.; LEE, I.-S.; SANTERO, N. J.; DAM, T. VAN; WANG, T. **Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines**. University of California Pavement Research Center, California, 2010.

HARVEY, J.; MEIJER, J.; KENDALL, A. **Life Cycle Assessment of Pavements**. FHWA-HIF-15-001. Federal Highway Administration, California, 2014.

HONG, F.; CHEN, D.-H.; MIKHAIL, M. M. **Long-Term Performance Evaluation of Recycled Asphalt Pavement Results from Texas**. Journal of the Transportation Research Board, v. 2180, p. 58–66, 2011.

HORVATH, A.; HENDRICKSON, C. **Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements**. Transportation Research Record, v. 1626, n. 98, p. 105–113, 1998.

HUANG, Y. **Life Cycle Assessment of Use of Recycled Materials in Asphalt Pavements**. Newcastle University, 2007.

HUANG, Y.; BIRD, R. N.; HEIDRICH, O. **A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements**. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, n. 1, p. 58–73, 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Desig**. 2ª ed. Prentice Hall, n. p. 775, 1993.

HUNT, R. G.; SELLERS, J. D.; FRANKLING, W. E. **Resource and environmental profile analysis: a life cycle environmental assessment for products and procedures**. Environmental Impact Assessment Review, v. 12, p. 245–269, 1992.

INYIM, P.; PEREYRA, J.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. **Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review**. Journal of Environmental Management, v. 176, p. 128–138, 2016.

JRC-IES: EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Local Governments. FHWA. Washington, 1997.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos**. Production, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2015.

MROUEH, U. M.; LAINE-YLIJOKI, J.; ESKOLA, P. **Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction**. Waste Management Series, v. 1, n. C, p. 438–448, 2001.

OMETTO, A. R. **Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool etílico Hidratado Combustível Pelos Métodos EDIP, Exergia e Emergia**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PE INTERNATIONAL. **Introduction to LCA and modeling using GaBi**. Universidade de Stuttgart, Disponível em: < www.GaBi-software.com/uploads/media/Paper_Clip_Tutorial_Handbook_Part1.pdf>, 2013.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho De Pavimentos Permeáveis Como Medida Mitigadora Da Impermeabilização Do Solo Urbano**. 256 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

REMMEN, A.; JENSEN, A. A.; FRYDENDAL, J. **Life Cycle Management : A Business Guide to Sustainability**. Disponível em: <www.unep.org/pdf/dtie/DTI0889PA.pdf>, 2007.

ROBINETTE, C.; EPPS, J. **Energy, Emissions, Material Conservation, and Prices Associated with Construction, Rehabilitation, and Material Alternatives for Flexible Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2179, n. 1, p. 10–22, 2011.

SANTERO, N. J.; MASANET, E.; HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 9–10, p. 801–809, 2011a.

_____. **Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps**. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 9–10, p. 810–818, 2011b.

SANTOS, J.; BRYCE, J.; FLINTSCH, G.; FERREIRA, A.; DIEFENDERFER, B. **A Life Cycle Assessment of in-Place Recycling and Conventional Pavement Construction and Maintenance Practices**. The International Journal of Life Cycle Assessment, p. 49–60, 2014.

SCHENCK, R. **Using LCA for procurement decisions. A case study performed for the US Environmental Protection Agency**. Environmental Progress. 19, p. 110–116, 2000.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. DE M.; PEREIRA, S. W. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil.** Capítulo de SATTler, M. A.; PEREIRA, F. O. R. Construção e Meio Ambiente. v. 7. p. 96–127. Porto Alegre, 2006.

STRIPPLE, H. **Life cycle assessment of Road:** a pilot study for inventory analysis, 2^a ed. Swedish National Road Administration. Gothenburg, 2001.

VANDUINEN, M.; DEISL, N. **Handbook to Explain LCA Using the GaBi EDU Software Package.** Boston: PE Americas, 2009.

VENTURA, A.; JULLIEN, A. **Life cycle assessment applied to road pavements : an analysis of method and results relevancy.** The Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, p. 1210–1219, 2009.

WEIDEMA, B. P. **Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment.** J. Ind. Ecol. 4, 11–33. v. 4, 2001.

WEIDEMA, B. P.; EKVALL, T.; HEIJUNGS, R. **Guidelines for applications of deepened and broadened LCA: consequential LCA.** Capítulo de CALCAS project. Deliverable D18. Disponível em:
< www.lcanet.com/files/consequential_LCA_CALCAS_final.pdf>, p. 49, 2009.

WEILAND, C.; MUENCH, S. T. **Life-Cycle Assessment of Reconstruction Options for Interstate Highway Pavement in Seattle, Washington.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2170, n. 1, p. 18–27, 2010.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products.** Volume 1, Kluwer Academic Publishers. 1997.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. DA. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** Produção, v. 23, n. 2, p. 436–447, 2013.

WIRTGEN GROUP COMPANY. **Technical specification: Remixer 4500.** Disponível em:
<www.wirtgen.de/en/products/hot-recyclers/remixer/>. 2013

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design.** Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., Londres, p. 711, 1975.

ANEXO

Neste Anexo se encontra o Inventário do Ciclo de Vida dos processos retirados do banco de dados *USLCI*. A Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 são os dados de inputs e outputs de todos os processos, separadamente.

Tabela 20 - Dados do *USLCI* de input do processo “*Petroleum refining, at refinery*”

Inputs	Category	Unit	Amount
Crude oil, extracted	Chemical Manufacturing/Petrochemical Manufacturing	kg	1.02e+00
Electricity, at grid, US, 2008	Utilities/Fossil Fuel Electric Power Generation	kWh	1.43e-01
Liquefied petroleum gas, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	l	1.15e-03
Natural gas, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	m3	1.11e-02
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	l	2.72e-02
Transport, barge, diesel powered	Water Transportation/Inland Water Freight Transportation	t*km	2.88e-04
Transport, barge, residual fuel oil powered	Water Transportation/Inland Water Freight Transportation	t*km	9.58e-04
Transport, ocean freighter, diesel powered	Water Transportation/Deep Sea Freight Transportation	t*km	4.90e-01
Transport, ocean freighter, residual fuel oil powered	Water Transportation/Deep Sea Freight Transportation	t*km	4.41e+00
Transport, pipeline, unspecified petroleum products	Utilities/Fossil Fuel Electric Power Generation	t*km	6.52e-01

Tabela 21 - Dados do *USLCI* de output do processo *Petroleum refining, at refinery*

Outputs	Category	Unit	Amount
Petroleum refining, at refinery	Product	kg	1.00e+00
Diesel, at refinery	Product	l	2.52e-01
Bitumen, at refinery	Product	kg	3.72e-02
Ammonia	air/unspecified	kg	3.58e-06
Ammonia	water/unspecified	kg	1.54e-05
Antimony	air/unspecified	kg	2.04e-09
Arsenic	air/unspecified	kg	2.57e-10
BOD5, Biological Oxygen Demand	water/unspecified	kg	3.39e-05
Benzene	air/unspecified	kg	1.08e-06
COD, Chemical Oxygen Demand	water/unspecified	kg	2.33e-04
Carbon dioxide, fossil	air/unspecified	kg	2.51e-04
Carbon monoxide	air/unspecified	kg	4.24e-04
Chromium	water/unspecified	kg	3.05e-09
Chromium	air/unspecified	kg	6.76e-10
Ethylene dibromide	air/unspecified	kg	4.27e-09
Lead	water/unspecified	kg	9.85e-10
Mercury	water/unspecified	kg	6.03e-11
Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	air/unspecified	kg	2.18e-08
Methane, fossil	air/unspecified	kg	3.70e-05
Methane, tetrachloro-, CFC-10	air/unspecified	kg	1.36e-09
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	air/unspecified	kg	6.78e-04
Nickel	air/unspecified	kg	5.75e-09
Nitrogen oxides	air/unspecified	kg	4.23e-04
Oils, unspecified	water/unspecified	kg	1.06e-05
Particulates, < 10 um	air/unspecified	kg	3.15e-05
Particulates, < 2.5 um	air/unspecified	kg	2.31e-05
Phenol	water/unspecified	kg	2.26e-07
Polycyclic organic matter, unspecified	air/unspecified	kg	5.58e-08
SO2	air/unspecified	kg	2.47e-04
Selenium	water/unspecified	kg	1.60e-09
Sulfide	water/unspecified	kg	1.86e-07
Suspended solids, unspecified	water/unspecified	kg	2.79e-05
Vanadium	water/unspecified	kg	5.36e-08

Tabela 22 - Dados de input e output *USLCI* do processo “*Transport, single unit truck, diesel powered*”

Inputs	Category	Unit	Amount
Diesel, at refinery	Petroleum and Coal Products Manufacturing/Petroleum Refineries	L	2.82e-02
Output	Category	Unit	Amount
Carbon dioxide, fossil	Air/unspecified	kg	1.71e-01
Carbon monoxide, fossil	Air/unspecified	kg	2.46e-04
Dinitrogen monoxide	Air/unspecified	kg	6.19e-06
Methane, fossil	Air/unspecified	kg	4.13e-06
Nitrogen oxides	Air/unspecified	kg	1.22e-03
Particulates, < 10 um	Air/unspecified	kg	2.35e-05
Sulfur oxides	Air/unspecified	kg	3.77e-05
Transport, single unit truck, diesel powered	Truck Transportation/General Freight Trucking	t*km	1.00e+00
VOC, volatile organic compounds	Air/unspecified	kg	8.42e-05

Tabela 23 - Dados de input e output *USLCI* do processo “*Limestone, at mine*”

Inputs	Category	Unit	Amount
Bituminous coal, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	kg	3.58e-05
Diesel, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	l	5.84e-04
Electricity, at grid, US, 2000	Utilities/Electric Power Distribution	kWh	4.23e-03
Gasoline, combusted in equipment	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	l	5.11e-05
Limestone	resource/ground-	kg	1.00e+00
Natural gas, combusted in industrial boiler	Utilities/Steam and Air-Conditioning Supply	m3	1.40e-04
Outputs	Category	Unit	Amount
Limestone, at mine	Mining (except Oil and Gas)/Limestone Mining and Quarrying	kg	1.00e+00
Particulates, unspecified	air/unspecified	kg	5.11e-05

A seguir, estão o memorial de cálculos para a ACV com os dados do banco de dados *USLCI*.

Tabela 24 - Cálculo de quantidade total de mistura asfáltica

Parâmetro	Convencional	Com RPA	Unidade
Dosagem de ligante asfáltico	5,5	6,5	%
Massa específica da mistura	2,332	2,343	g/cm3
Volume - Fluxo de referência	400	400	m3
Quantidade total de mistura	932,80	937,20	tons

Tabela 25 - Cálculo para teor de agente rejuvenescedor e de teor de asfalto adicional

Teor de Agente Rejuvenescedor		Teor de asfalto adicional	
P1	6,5	Total	4,60
P2	5,5	Betume	4,31
r	65	Agente Rejuvenescedor	0,29
Teor de AR: 0 a 30% do teor de ligante			
Considerar	15		

Tabela 26 - Cálculos para consumo de diesel, na atividade de transporte para aterro

Caminhão basculante - Convencional	
Toneladas transportadas	932,8
Caminhões	42,4
	43
Litros de diesel	817
Caminhão basculante - Com RPA	
Toneladas transportadas	609,18
Caminhões	27,7
	28
Litros de diesel	532

Tabela 27 - Cálculos para consumo de diesel, na atividade de transporte para local de restauração

Convencional						
Caminhão basculante	Tons	Capacidade (tons)	Consumo L/100 km	Quantidade de caminhões		Consumo de Diesel (L)
	932,80	22	38	42,40	43	50
						817,0
COM RPA						
Usina móvel	Tons	Consumo vazio (L)	Consumo cheio (L)	Quantidade de usinas		Consumo total (L)
	52,05	148,00	-	1,00	4	148,0
Caminhão basculante	Tons	Capacidade (tons)	Consumo L/100 km	Quantidade de caminhões		Consumo de Diesel (L)
	773	22	38	35,15	36	50
						684,0

Tabela 28 – Cálculos de AICV dos dados coletados da *USLCI* para o processo “*Petroleum, at refinery*” (continua)

Produto	Origem	Valor	Unidade	AC	ET	AG	TA	TS	TG	FF
Petroleum refining, at refinery	Petroleum and Coal Products	1	kg							
Bitumen, at refinery	Manufacturing/Petroleum Refineries	0,0372	kg							
Diesel, at refinery		2,52E-01	l							
Ammonia	air/unspecified	3,58E-06	kg	6,73E-06						
Ammonia	water/unspecified	1,54E-05	kg							
Antimony	air/unspecified	2,04E-09	kg		2,05E-05		4,08E-02	3,46E-05	1,30E-04	
Arsenic	air/unspecified	2,57E-10	kg		6,85E-08		1,29E+00	2,67E-06	1,91E-07	
BOD5, Biological Oxygen Demand	water/unspecified	3,39E-05	kg							
Benzene	air/unspecified	1,08E-06	kg		3,88E-03		1,08E+04	1,57E-02	2,43E-03	4,32E-07
COD, Chemical Oxygen Demand	water/unspecified	0,000233	kg							
Carbon dioxide, fossil	air/unspecified	0,000251	kg			2,51E-04				
Carbon monoxide	air/unspecified	0,000424	kg			8,48E-04				1,70E-05
Chromium	water/unspecified	3,05E-09	kg						5,57E-05	
Chromium	air/unspecified	6,76E-10	kg		7,21E-09		6,76E-01	7,60E-07	2,47E-06	
Ethylene dibromide	air/unspecified	4,27E-09	kg						1,13E-03	
Lead	water/unspecified	9,85E-10	kg		5,25E-06		6,57E+00	8,01E-05	1,07E-01	
Mercury	water/unspecified	6,03E-11	kg							
Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	air/unspecified	2,18E-08	kg			5,45E-07				1,53E-10
Methane, fossil	air/unspecified	0,000037	kg							
Methane, tetrachloro-, CFC-10	air/unspecified	1,36E-09	kg							
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	air/unspecified	0,000678	kg							

Tabela 28 – Cálculos de AICV dos dados coletados da *USLCI* para o processo “*Petroleum, at refinery*” (conclusão)

Produto	Origem	Valor	Unidade	AC	ET	AG	TA	TS	TG	FF
Nickel	air/unspecified	5,75E-09	kg		3,07E-07		3,83E-01	6,76E-07	2,13E-08	
Nitrogen oxides	air/unspecified	0,000423	kg	2,96E-04			3,65E+03	1,24E-03	3,14E-06	
Oils, unspecified	water/unspecified	1,06E-05	kg							
Particulates, < 10 um	air/unspecified	3,15E-05	kg							
Particulates, < 2.5 um	air/unspecified	2,31E-05	kg							
Phenol	water/unspecified	2,26E-07	kg						7,74E-06	9,04E-08
Polycyclic organic matter, unspecified	air/unspecified	5,58E-08	kg							
SO2	air/unspecified	0,000247	kg	2,47E-04			3,17E+02			
Selenium	water/unspecified	1,6E-09	kg						2,22E-04	
Sulfide	water/unspecified	1,86E-07	kg							
Suspended solids, unspecified	water/unspecified	2,79E-05	kg							
Vanadium	water/unspecified	5,36E-08	kg				2,09E+01		9,94E-06	
Somatório de impactos para 1kg de petróleo				5,50E-04	3,91E-03	1,10E-03	1,48E+04	1,70E-02	1,11E-01	1,75E-05
Impactos para 1l de diesel				2,18E-03	1,55E-02	4,36E-03	5,87E+04	6,75E-02	4,41E-01	6,94E-05
Impactos para 1kg de betume				1,48E-02	1,05E-01	2,96E-02	3,98E+05	4,57E-01	2,99E+00	4,70E-04

Tabela 29 - Cálculos de AICV dos dados coletados da *USLCI* para o processo “*Transport, single unit truck, diesel powered*”

Output	Valor	Unidade	AC	ET	AG	TA	TS	TG	FF
Carbon dioxide, fossil	1,71E-01	kg			1,71E-01				
Carbon monoxide, fossil	2,46E-04	kg			4,92E-04				9,84E-06
Dinitrogen monoxide	6,19E-06	kg							
Methane, fossil	4,13E-06	kg							
Nitrogen oxides	1,22E-03	kg	8,54E-04			1,05E+04	3,57E-03	9,05E-06	
Particulates, < 10 um	2,35E-05	kg							
Sulfur oxides	3,77E-05	kg							
Transport, single unit truck, diesel powered	1,00E+00	t*km							
VOC, volatile organic compounds	8,42E-05	kg							3,37E-05
Somatório para 1 t*km de transporte			8,54E-04	-	1,71E-01	1,05E+04	3,57E-03	9,05E-06	4,35E-05