

**MARCUS VINICIUS MOURA ALENCAR**

**Análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização do material fresado nas  
camadas de sub-base de pavimentos asfálticos**

**Marcus Vinicius Moura Alencar**

**Análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização do material fresado nas camadas de sub-base de pavimentos asfálticos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vivian Silveira dos Santos Bardini

Coorientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Marcia Regina de Freitas

A368a Alencar, Marcus Vinicius Moura  
Análise da viabilidade técnica e ambiental da utilização do material fresado nas camadas de sub-base de pavimentos asfálticos / Marcus Vinicius Moura Alencar – Guaratinguetá, 2020.  
79 f. : il.  
Bibliografia : f. 77-79

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.  
Orientadora: Profª Drª. Vivian Silveira dos Santos Bardini  
Coorientadora: Profª Drª. Márcia Regina de Freitas

1. Pavimentos de asfalto. 2. Rodovias – Projeto e construção.  
3. Planejamento rodoviário I. Título

CDU 625.85

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

**MARCUS VINICIUS MOURA ALENCAR**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Profª Drª ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**



Profª Drª VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI  
Orientador/UNESP-ICT



Profª Drª ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN  
UNESP-FEG



Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES  
UNESP-FEG

Novembro de 2020

dedico este trabalho

de modo especial, à minha família, que esteve comigo em todos os momentos me ajudando a superar as dificuldades e me ajudando a conquistar meus objetivos. Obrigado por fazerem o impossível se tornar possível, com todo o amor e carinho do mundo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dra. Vivian Silveira dos Santos Bardini* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Marcos Geraldo Alencar e Ana Maria de Moraes Moura Alencar*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

a todos meus familiares, parentes e amigos de faculdade, que de alguma forma me ajudaram ao longo dessa caminhada.

...“Os soldados mais fortes não são descobertos em tempos de paz e sim resistindo em meio de suas guerras...”

Júlio César

## RESUMO

A infraestrutura de transportes é essencial para o desenvolvimento econômico de um país. Contudo, o desenvolvimento também é responsável por gerar impactos ambientais, que em sua maioria afeta o meio ambiente como um todo. Tendo em vista esse contexto, os métodos construtivos que visam a sustentabilidade se tornam uma solução para a atual situação do desenvolvimento das infraestruturas. A análise do ciclo de vida – LCA (Life Cycle Analysis), juntamente com a análise mecanicista do pavimento são ferramentas que possibilitam quantificar e analisar os impactos gerados e a qualidade de uma determinada obra rodoviária. Neste trabalho é estudado a utilização do material fresado nas camadas de sub-base dos pavimentos, qualificando o material produzido pela Concessionária Nova Dutra nos termos técnicos e ambientais. Duas situações foram comparadas ao longo do trabalho, a primeira consiste em uma estrutura semirrígida invertida, que utiliza apenas materiais virgens em sua construção, apresentando um adicional de 2% e 3% de cimento à mistura de BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento), e a segunda situação na qual é utilizada uma mistura asfáltica com teor de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) em sua construção igual a 63%, e com os mesmos adicionais de 2% e 3% de cimento a essa mistura. Após a comparação dos dados obtidos, foi possível averiguar de maneira geral, sob as diretrizes estabelecidas, qual estrutura levaria à uma maior pegada ambiental. Os ensaios laboratoriais realizados com o material fresado mostraram que o uso desse material não é recomendado pelo DER/SP (Departamento de Estradas de Rodagem) para o tipo de rodovia estudada, estando abaixo dos valores mínimos recomendados. As análises do ciclo de vida dos pavimentos que possuem um teor de 63% de RAP se mostraram ecologicamente mais viáveis, em todos os critérios de impactos estudados. Apesar da restrição do uso do material fresado em pavimentos com grande volume de tráfego, a junção das análises técnicas e ambientais mostraram que em pavimentos de menor tráfego ou mesmo em faixa de menores serviços da rodovia, o uso desse material pode ser uma alternativa para a diminuição da pegada ambiental gerada pelas obras rodoviárias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise do ciclo de vida. Pavimentos. Material fresado. Revestimento asfáltico reutilizável (Reclaimed asphalt pavement). Impactos ambientais. Viabilidade técnica.

## ABSTRACT

Transport infrastructure is essential for a country's economic development. However, development is also responsible for generating environmental impacts, which mostly affect the environment as a whole. In view of this context, the constructive methods that view sustainability become a solution for the current situation of infrastructure development. The Life Cycle Analysis – LCA, together with the mechanistic analysis of the pavement are tools that make it possible to quantify and analyze the impacts generated and the quality of a given road work. In this work, the use of the milled material in the subbase layers of the pavement is studied, qualifying the material produced by Nova Dutra Concessionaire in technical and environmental terms. Two situations were compared throughout the work, the first one consists of an inverted semi-rigid structure, which uses only virgin materials in its construction, presenting an additional 2% and 3% cement to the mixture of Graduated Grain Treated with Cement (BGTC), and the second situation in which an asphalt mixture with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) content is used in its construction equal to 63%, and with the same additional 2% and 3% cement to this mixture. After comparing the data obtained, it was possible to ascertain in general, under the established guidelines, which structure would lead to a greater environmental footprint. The laboratory tests carried out with the milled material showed that the use of this material is not recommended by Department of Highways of São Paulo (DER/SP) for the type of highway studied, being below the recommended minimum values. The Life Cycle Analyses of pavements that have a 63% RAP content proved to be ecologically more viable, in all the impact criteria studied. Despite the restriction of the use of milled material on pavements with a high volume of traffic, the combination of technical and environmental analyses showed that on pavements with less traffic or even in a range of lower highway services, the use of this material can be an alternative for reduction of the environmental footprint generated by road works.

**KEYWORDS:** Life cycle analysis. Pavement. Milled material. Reclaimed asphalt pavement. Environmental impacts. Technical viability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria dos pavimentos .....	17
Figura 2 – Estrutura de pavimento-tipo rígido .....	18
Figura 3 – Representação das cargas nos pavimentos rígidos .....	18
Figura 4 – Estrutura pavimento-tipo flexível .....	19
Figura 5 – Representação das cargas nos pavimentos flexíveis .....	20
Figura 6 – Composição do pavimento-tipo .....	20
Figura 7 – Classificação MCT (miniatura compactada tropical) .....	24
Figura 8 – Fenda .....	26
Figura 9 – Afundamento .....	26
Figura 10 – Ondulação .....	27
Figura 11 – Escorregamento .....	27
Figura 12 – Exsudação .....	28
Figura 13 – Desgaste .....	28
Figura 14 – Painel .....	29
Figura 15 – Remendo .....	29
Figura 16 – Ábaco para determinação de espessuras do pavimento .....	31
Figura 17 – Fases e fluxos de uma análise do ciclo de vida .....	32
Figura 18 – Ensaio CBR .....	36
Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão simples .....	37
Figura 20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	37
Figura 21 – Mapa do município de Itu .....	42
Figura 22 – Mapa hipsométrico da região de Itu .....	43
Figura 23 – Mapa geológico da região do município de Itu .....	44
Figura 24 – Gráficos de resistência à compressão e a tração .....	47
Figura 25 – Gráfico do módulo dinâmico .....	48
Figura 26 – Vista horizontal da rodovia .....	49
Figura 27 – Estrutura do pavimento .....	50
Figura 28 – Dimensionamento do pavimento .....	59
Figura 29 – Tela inicial software Medina .....	61
Figura 30 – Modelo final .....	64
Figura 31 – Fluxograma do ciclo de vida .....	67
Figura 32 – Resultados potencial de acidificação, partículas HH e eutrofização .....	71

Figura 33 – Resultados potencial de aquecimento global e efeito estufa.....	72
Figura 34 – Resultados energia primaria total, energia não renovável e combustível fóssil ..	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das rodovias.....	40
Quadro 2 – Dados dos ensaios.....	47
Quadro 3 – Classificação da resiliência dos solos .....	51
Quadro 4 – Determinação do número N.....	54
Quadro 5 – Valores usuais de coeficiente de Poisson.....	55
Quadro 6 – Valores usuais de módulo de resiliência .....	55
Quadro 7 – Espessura mínima de revestimento betuminoso .....	58
Quadro 8 – Coeficiente de equivalência estrutural.....	59
Quadro 9 – Descrição das camadas .....	60
Quadro 10 – Descrição da nova estrutura.....	63
Quadro 11 – Equipamentos utilizados .....	68
Quadro 12 – Quantidade de serviços para construção inicial.....	69
Quadro 13 – Dados dos impactos ambientais potencial de acidificação, partículas HH e potencial de eutrofização .....	70
Quadro 14 – Dados dos impactos ambientais potencial de aquecimento global e efeito estufa	71
Quadro 15 – Dados dos impactos ambientais energia primaria total, energia não renovável e combustíveis fósseis .....	73
Quadro 16 – Dados comparativos dos impactos ambientais .....	74

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Pavimentos rígidos</b> .....	17
<b>2.1.2</b>	<b>Pavimentos flexíveis</b> .....	19
<b>2.1.3</b>	<b>Pavimentos semirrígidos</b> .....	20
2.2	ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	21
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	21
<b>2.3.1</b>	<b>Revestimento asfáltico</b> .....	22
<b>2.3.2</b>	<b>Brita graduada simples</b> .....	22
<b>2.3.3</b>	<b>Brita graduada tratada com cimento</b> .....	23
<b>2.3.4</b>	<b>Materiais reciclados</b> .....	23
<b>2.3.5</b>	<b>Solo laterítico argiloso</b> .....	23
2.4	DEFEITOS NOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Causas dos defeitos</b> .....	25
<b>2.4.2</b>	<b>Tipos de defeitos</b> .....	25
2.4.2.1	Fenda .....	26
2.4.2.2	Afundamento .....	26
2.4.2.3	Ondulação .....	27
2.4.2.4	Escorregamento .....	27
2.4.2.5	Exsudação .....	28
2.4.2.6	Desgaste .....	28
2.4.2.7	Panela ou buraco .....	29
2.4.2.8	Remendo .....	29
2.5	ANÁLISE EMPÍRICA MECANICISTA .....	30
2.6	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA .....	32
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	35
3.1	MÉTODOS .....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Índice de suporte califórnia (california bearing ratio)</b> .....	36
<b>3.1.2</b>	<b>Resistência à compressão simples</b> .....	36
<b>3.1.3</b>	<b>Resistência à tração por compressão diametral</b> .....	37
<b>3.1.4</b>	<b>Módulo dinâmico</b> .....	38

3.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO .....	38
3.2.1	<b>Tipo de pavimento</b> .....	38
3.2.2	<b>Etapa do projeto</b> .....	38
3.2.3	<b>Normas aplicadas</b> .....	39
3.2.4	<b>Classe da rodovia</b> .....	40
3.3	INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS .....	41
3.3.1	<b>Localização</b> .....	41
3.3.2	<b>Verificação topográfica</b> .....	42
3.3.3	<b>Verificação geológica</b> .....	43
3.3.4	<b>Materiais</b> .....	44
3.3.4.1	Solos do subleito.....	45
3.3.4.2	Reforço do subleito.....	45
3.3.4.3	Sub-base e base.....	45
3.3.4.4	Camada de rolamento e de binder .....	46
3.4	DADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS .....	46
3.5	CRITÉRIOS DE CÁLCULO ESTRUTURAL .....	49
3.5.1	<b>Concepção da estrutura do pavimento</b> .....	49
3.5.1.1	Perfil da estrutura.....	49
3.5.2	<b>Parâmetros de projeto</b> .....	51
3.5.2.1	Capacidade de suporte do subleito .....	51
3.5.2.2	Tráfego.....	52
3.5.2.3	Parâmetros adicionais para a verificação mecanicista.....	54
3.5.3	<b>Dimensionamento estrutural do pavimento</b> .....	56
3.5.3.1	Departamento de estradas de rodagem do estado de São Paulo – DER/SP.....	57
3.5.4	<b>Verificação mecanicista</b> .....	60
3.5.5	<b>Adequação</b> .....	62
3.5.6	<b>Modelo final</b> .....	63
3.6	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA .....	64
3.6.1	<b>Escopo</b> .....	64
3.6.2	<b>Inventário do ciclo de vida</b> .....	67
3.6.3	<b>Análise de impacto</b> .....	69
3.6.4	<b>Resultados e discussões</b> .....	70
4	CONCLUSÃO.....	75

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
--------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma sociedade está vinculado diretamente as suas obras de engenharia. Em diversos setores a engenharia se mostra vital para o crescimento de suas infraestruturas, possibilitando assim uma melhoria na qualidade de serviços prestados à sociedade e para a resolução de problemas de cunho sociais e econômicos. Por outro lado, a construção civil é um dos setores que mais causam impactos ambientais. A construção civil é reconhecida como uma das atividades de maior pegada ecológica em nosso planeta (TREVISAN, 2012). Esses impactos são causados desde o consumo excessivo de recursos naturais, passando por mudanças nas vegetações e solos das áreas construídas, chegando até no aumento de gastos com energia elétrica.

Analisando particularmente a área de construção de infraestrutura de pavimentos a situação não foge dessa realidade. As construções rodoviárias estão relacionadas a importantes impactos ambientais. Os efeitos colaterais são potencializados quando atingem áreas ambientalmente importantes. A Agência Internacional de Energia (2010) calcula que haverá um aumento de 14 milhões de quilômetros de novas rodovias pavimentadas até 2030. Também de acordo com a Agência Internacional de Energia, cerca de 90% dessas novas rodovias serão estabelecidas nas nações em desenvolvimento, que são responsáveis por sustentarem os ecossistemas biologicamente mais importantes da Terra (REZENDE; COELHO, 2015). Diante dessa realidade de expansão, torna-se vital a procura de maneiras construtivas diversas capazes de diminuir e prevenir os impactos negativos vinculados as construções rodoviárias.

De acordo com o professor Vahan Agopyan (2014) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a construção civil é responsável pelo consumo de 40% a 75% da matéria-prima produzida no planeta. Analisando particularmente o consumo do cimento, uma das principais matérias-primas da construção civil, observamos um consumo anual da ordem de 6,9 bilhões de toneladas somente no ano de 2015 de acordo com a Organização Cimento.Org. Já o asfalto, que é obtido através do petróleo, no Brasil teve um consumo equivalente a 3,29 milhões de metros cúbicos somente no ano de 2014, esses valores são referentes as refinarias da Petrobras, que é a principal responsável pelo fornecimento dos asfaltos básicos no Brasil, dados fornecidos pela Associação Brasileira das Empresas de Asfaltos (ABEDA). Todos esses materiais essenciais para a construção civil possuem grande impacto ambiental. Um complexo viário impacta o meio desde à extração desses materiais, até os resíduos gerados da sua reconstrução ao longo da sua vida útil.

Segundo Vandereley M. John (2017) não existe material de construção que não cause impacto ambiental. Contudo, os impactos ambientais vão muito além dos materiais envolvidos. Uma obra viária possui uma complexa cadeia de execução. Neste aspecto, a escolha dos materiais que serão consumidos durante o andamento de uma determinada obra, assim como a sua forma de execução se tornam fatores importantes para a sustentabilidade da mesma. Desta forma, nota-se a importância cada vez maior de se considerar todos os fatores que envolvem uma obra viária, para que sejam tomadas as decisões mais adequadas.

A qualidade da superfície do pavimento em uma rodovia também é um quesito fundamental a ser investigado. Um pavimento de baixa qualidade interfere diretamente no custo operacional da atividade transportadora. De acordo com o DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, quando a situação de um pavimento se altera de um conceito “bom” para um “ruim”, devido à falta de manutenção ou mesmo por uma manutenção ineficaz, os impactos podem ser vistos através do aumento de até 58% do consumo de combustível, no aumento de até 100% no tempo de tráfego, aumento de 38% no custo de manutenção dos veículos e um aumento de até 50% no índice de acidentes (GERMANO, 2009). De forma geral, podemos observar que as rodovias brasileiras, após curtos períodos de tempo começam a apresentar imperfeições em suas estruturas. De acordo com o DNIT (2003) as principais imperfeições das rodovias são as fendas, afundamento, ondulações, escorregamento, exsudação, o desgaste e os buracos. Portanto a implantação de um plano de conservação e manutenção dos pavimentos é um recurso essencial para a diminuição dos gastos e da sobrevivência da estrutura.

A durabilidade das estruturas também é responsável pela diminuição do consumo de matérias-primas e pela redução de resíduos gerados ao longo da sua vida útil. Uma estrada bem projetada, no local adequado e com o acompanhamento preventivo representa uma construção mais sustentável. Portanto, é essencial ter em vista que uma obra rodoviária necessita atender ao máximo todos os tópicos de qualidade, para que ela possa se tornar o mais sustentável possível.

A sustentabilidade ambiental está sendo cada vez mais adotada como uma realidade para a concepção e construção de um pavimento e não somente o aspecto econômico (SOUZA, 2017). Para tal, é necessário um estudo que conduza os planejamentos a realizarem obras mais sustentáveis. Uma técnica que possibilita a realização dessa verificação é a análise do ciclo de vida – LCA (Life Cycle Analysis). Essa metodologia analisa um produto ou um sistema de produção averiguando por completo os impactos gerados em todo o seu processo. A grande contribuição desse método consiste na identificação dos impactos mais relevantes na

cadeia de produção e execução do produto. Nesse contexto, essa ferramenta é capaz de proporcionar dados que possibilitam as discussões sobre possíveis soluções para a redução, ou remediação dos impactos ambientais causados na indústria da pavimentação. Considerando o uso da LCA no Brasil, podemos observar que o seu uso ainda é embrionário no setor rodoviário.

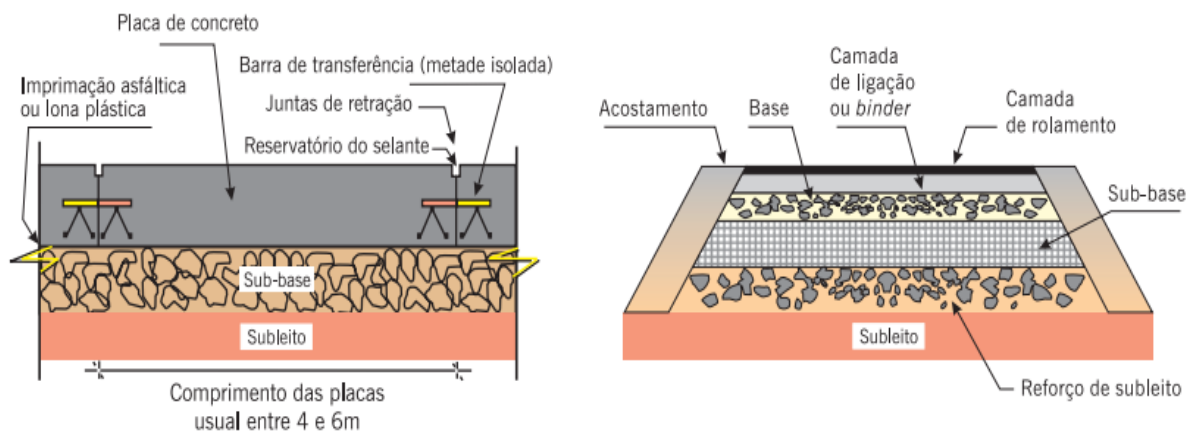
A necessidade de obras mais ecológicas e sustentáveis representa o principal motor para o desenvolvimento desse trabalho. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos impactos gerados por dois modelos de pavimentos, o primeiro utilizando materiais virgens e o segundo utilizando materiais reciclados. Esses pavimentos possuem a mesma estrutura, variando apenas os materiais e os equipamentos necessários para cada modelo. É essencial garantir de forma adequada que cada modelo apresente uma funcionalidade com relação ao seu uso, portanto foram realizadas análises estruturais, garantindo que os modelos apresentem qualidade e durabilidade. Foi utilizado como ferramenta a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) considerando as duas unidades funcionais para a realização da comparação dos impactos ambientais. Ao final do estudo, são discutidos os resultados obtidos, analisando as vantagens e as limitações da aplicação dessa ferramenta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS

“Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos” (MOTTA, 2008, p. 9). As estruturas dos pavimentos são formadas por quatro camadas principais, o revestimento asfáltico, a base, sub-base e o reforço do subleito. A engenharia rodoviária agrupa os tipos de pavimentos em três categorias segundo a sua rigidez. Podemos classificar os pavimentos como rígidos, semirrígidos e os flexíveis. Cada estrutura apresenta um pavimento-tipo característico como é observado na Figura 1.

Figura 1 – Geometria dos pavimentos: (a) Rígido (corte longitudinal); (b) Flexível (corte transversal)

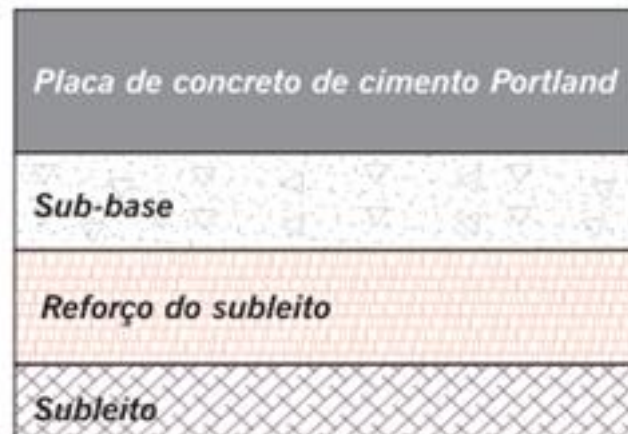


Fonte: Motta (2010).

#### 2.1.1 Pavimentos rígidos

De acordo com Motta (2010), os pavimentos rígidos são, em geral compostos por uma placa de concreto de cimento Portland (podem ser armadas ou não) na parte superior da estrutura, seguido de uma camada de sub-base, uma camada de reforço de subleito e por fim uma camada de subleito. A figura 2 apresenta um esquema de um pavimento-tipo mostrando suas camadas.

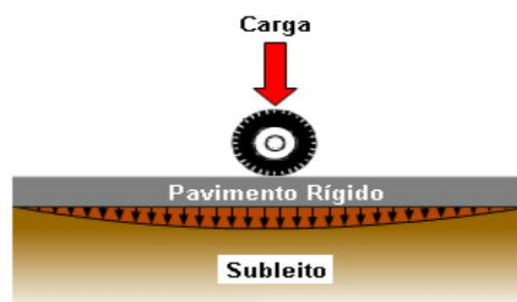
Figura 2 – Estrutura de pavimento-tipo rígido



Fonte: Motta (2010).

Analisando a parte estrutural do pavimento rígido, a distribuição dos esforços aplicados sob a estrutura ocorre em uma área relativamente maior devido a placa de cimento Portland em sua superfície. Essa redistribuição permite que a estrutura não necessite da camada de base. “A placa absorve maior parte das tensões, distribuição das cargas faz-se sobre uma área relativamente maior, qualidade de solo pouco interfere no comportamento estrutural pouco deformável e mais resistente à tração” (ARAÚJO, 2016). Na Figura 3 podemos observar como o pavimento rígido trabalha quando é aplicada uma carga sobre ele.

Figura 3 – Representação das cargas nos pavimentos rígidos

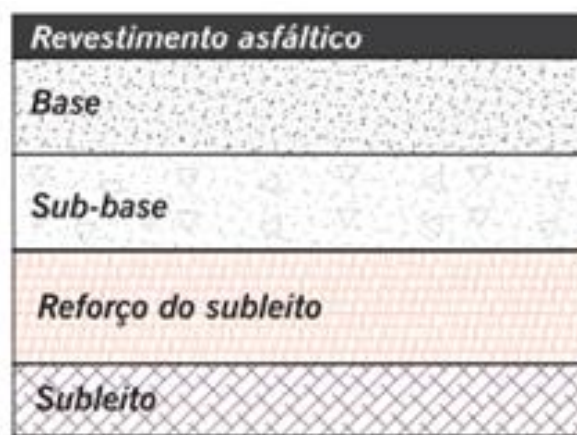


Fonte: Araújo (2016).

### 2.1.2 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são compostos, segundo Motta (2010), por uma camada superficial asfáltica (revestimento), sobre uma camada de base, seguido por uma camada de sub-base e de reforço de subleito, constituídas por solos, materiais granulares e misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes. Na Figura 4 podemos observar o pavimento-tipo característico de um pavimento flexível.

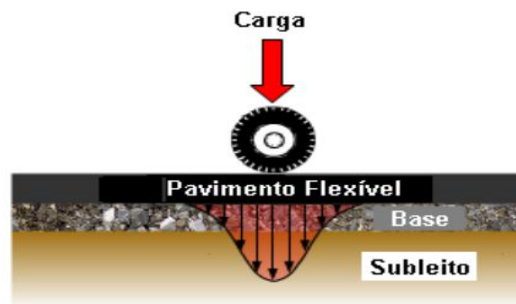
Figura 4 – Estrutura pavimento-tipo flexível



Fonte: Motta (2010).

Em relação a parte estrutural do pavimento, podemos observar que a carga se distribui de forma proporcional à rigidez das camadas (ARAÚJO, 2016). Portanto a qualidade do solo se torna importante para a sua caracterização. As tensões são distribuídas em uma área proporcionalmente menor quando comparada as estruturas rígidas, conseqüentemente é necessário a existência da camada de base na estrutura do pavimento, para que sejam absorvidas as tensões e as deformações sejam minimizadas. A Figura 5 mostra uma representação de um perfil de um pavimento-tipo flexível trabalhando sobre uma carga pontual.

Figura 5 – Representação das cargas nos pavimentos flexíveis



Fonte: Araújo (2016).

### 2.1.3 Pavimentos semirrígidos

Segundo o Manual Pavimentos Flexíveis e Rígidos do DER-Paraná (2008), os pavimentos semirrígidos possuem como característica a adição de cimento na sua camada de base. A composição do pavimento-tipo é representada na Figura 6, onde podemos ver a distribuição das camadas de revestimento, base cimentada, sub-base, reforço do subleito e subleito respectivamente.

Figura 6 – Composição do pavimento-tipo



Fonte: DER-PR (2008).

Assim como nos pavimentos flexíveis, os semirrígidos são revestidos por materiais asfálticos.

## 2.2 ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

As estruturas dos pavimentos consistem no sistema de camadas que se encontram acima da fundação do pavimento, ou seja, são as camadas que se encontram sobre o subleito. As reações estruturais oriundas dos carregamentos dependem da espessura das camadas presentes ao longo do corpo asfáltico, assim como das interações provenientes das diferentes camadas presentes no pavimento (MEDINA; MOTTA, 2005).

Os pavimentos são responsáveis por resistir aos esforços solicitantes, portanto o dimensionamento da estrutura deve ser realizado tendo em vista o tipo e o volume de tráfego. Também é necessário um estudo prévio das condições climáticas em que a estrutura estará sujeita. O conjunto das camadas que compõe a estrutura do pavimento asfáltico trabalha suportando os esforços solicitantes e transmitindo esses esforços às camadas inferiores (MOTTA, 2010).

Ao longo da sua vida útil, a estrutura do pavimento estará sujeita as cargas dos veículos passantes. Essas cargas são responsáveis por gerar tensões e deformações ao longo de toda a camada asfáltica, portanto o pavimento deve ser bem projetado para suportar essas cargas, e também deve ser bem construído. Garantindo assim que não ocorra deslocamentos excessivos, rupturas ou deformações nas camadas estruturais.

Os principais problemas vinculados as numerosas solicitações segundo DNIT (2003) são as fendas, afundamentos, ondulações, escorregamentos, exsudações, os degastes, placas e remendos. Esses danos devem ser minimizados, para que ocorram de forma controlada e que não ultrapassem o limite aceitável, além de não ocorrerem de forma excessiva dentro do período previsto em projeto. Para se dimensionar um pavimento de forma coerente, deve-se ter informações pertinentes sobre as propriedades dos materiais que estão presentes no pavimento (DNIT, 2006).

## 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas de um pavimento, está diretamente relacionada as propriedades e a caracterização dos materiais presentes em sua estrutura. A determinação das propriedades desses materiais é uma tarefa complexa, pois esses materiais são oriundos da natureza e não possuem um padrão. Percebe-se que os materiais dependem de fatores relacionados ao meio ambiente, sua origem e formação, do seu estado de tensões, entre outros fatores. Assim sendo, a caracterização dos materiais é realizada através de tecnologias

tradicionais que são responsáveis por balancear o rigor e a praticidade, possibilitando uma adequação ao estudo das propriedades mecânicas de cada material. Priorizam-se então os aspectos considerados de maior impacto para a determinação do comportamento dos pavimentos em campo (MOTTA, 2010, p. 287).

Os materiais das camadas do pavimento, de acordo com o DER/SP (2006) passam por duas etapas para a sua aplicação, a primeira etapa consiste na seleção dos materiais e a segunda etapa está relacionada a caracterização de suas propriedades. O processo de seleção dos materiais ocorre através da disponibilidade perante ao local da obra. Conseqüentemente, o processo de caracterização ocorre através dos ensaios laboratoriais dos materiais selecionados, de maneira geral, esses materiais de pavimentação devem ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade aceitável para o projeto.

### **2.3.1 Revestimento asfáltico**

O revestimento asfáltico, de acordo com Motta (2010) corresponde pela associação entre ligantes asfálticos e agregados. A propriedade mais relevante a ser analisada quando trabalhamos com os ligantes asfálticos é a sua relação com a temperatura. A temperatura representa o grau de agitação das moléculas, portanto em temperaturas baixas, as moléculas se encontram menos agitadas, dificultando assim a sua movimentação. Isso ocasiona um aumento na viscosidade dos revestimentos, podemos assumir que em temperaturas baixas, os ligantes possuem comportamento similar a um sólido. Seguindo esse mesmo raciocínio, o ligante asfáltico em temperaturas elevadas apresenta uma viscosidade menor, podendo assumir que em temperaturas altas o seu comportamento é similar à de um material líquido.

Ainda de acordo com Motta (2010), o asfalto é um material termoviscoelástico, por isso os ensaios responsáveis por mensurar suas propriedades físicas necessitam ter temperatura especificada, além de definir a velocidade e o tempo de carregamento.

### **2.3.2 Brita graduada simples**

A brita graduada simples, também conhecida como BGS, é um material granular com ampla aplicação no Brasil. Esse material é utilizado nas camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos.

A norma ABNT, 1991c; 1991f estabelece algumas condições para a qualidade desse material. Os agregados são derivados de rochas britadas e devem possuir granulometria bem-

graduada, com diâmetro máximo não superior a 38mm, os seus valores de índice de suporte califórnia devem ser altos, ou seja, superiores a 60% podendo chegar a valores superiores à 100%. O módulo de resistencia desse agregado deve estar na média de 100 a 400Mpa.

### **2.3.3 Brita graduada tratada com cimento**

A brita graduada tratada com cimento (BGTC), em princípio utiliza-se do mesmo material da BGS, tendo na sua composição a adição de cimento com a proporção em 3 a 5% em peso. A norma ABNT NBR 12261, 1991d e a norma ABNT NBR 12262, 1991e estabelecem as condições para a aplicação da BGTC nas estruturas dos pavimentos. O módulo de resiliência da BGTC deve estar na ordem de grandeza de 3000 a 12.000Mpa. Um ponto importante para ser analisado na BGTC, esta no tempo de cura do cimento. O cimento possui a característica de retração ao longo do seu tempo de cura, portanto os ensaios laboratoriais devem ser realizados levando em consideração o comportamento do material ao longo do tempo. A retração do cimento pode ocasionar fissuras e trincas quando não utilizada de maneira correta (NBR 12262, 1991). A BGTC tem sido utilizada frequentemente em pavimentos de vias com alto volume médio diário (VDM), que representa o volume de tráfego ao longo da via.

### **2.3.4 Materiais reciclados**

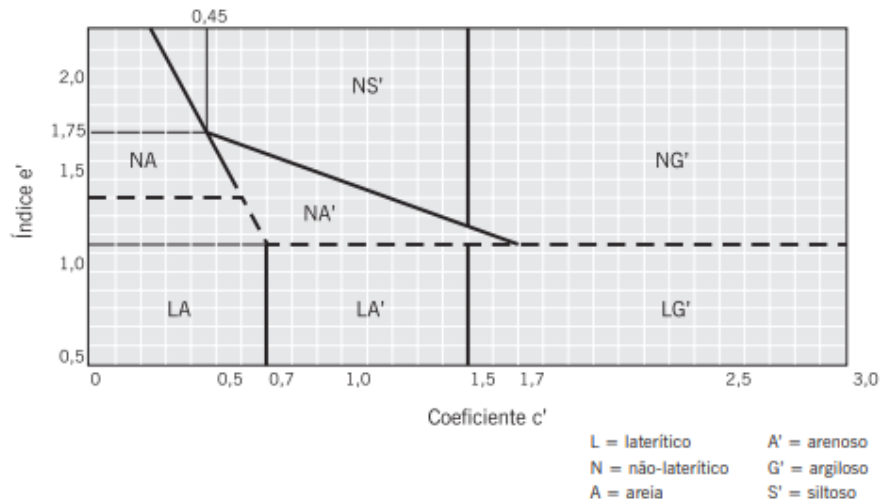
Os agregados reciclados de resíduos sólidos são regidos pela norma ABNT NBR 15115(2004). Esses materiais podem ser adicionados como reforço do subleito ou até mesmo nas camadas de base e sub-base da estrutura. Existem diversos materiais reciclados que podem ser adicionados na composição dos pavimentos. Para avaliar as suas aplicações e os seus comportamentos, é necessário a realização de pesquisas e ensaios referente a cada material.

### **2.3.5 Solo laterítico argiloso**

Existe uma classificação denominada como MCT (Miniatura Compactada Tropical), desenvolvida em 1981 pelos professores Nogami e Villibor, que possui como finalidade principal separar os solos de comportamento laterítico daqueles que apresentam comportamento não-laterítico. Essa classificação é apresentada na Figura 7. Ela se mostra

importante para a seleção do material pois está relacionada às características dos solos tropicais. Os solos lateríticos possuem propriedades típicas como elevada resistência, baixa deformabilidade e baixa expansibilidade. Para obras viárias, é essencial classificar o solo presente no subleito da estrutura.

Figura 7 – Classificação MCT (miniatura compactada tropical)



Fonte: Motta (2010).

## 2.4 DEFEITOS NOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS

O maior desafio enfrentado no planejamento de um pavimento, consiste na concepção de uma obra de engenharia que seja durável e funcional aliada com as suas restrições orçamentárias. Com relação a funcionalidade da pavimentação, é essencial garantir a trafegabilidade em qualquer período e em qualquer situação climática, proporcionando aos usuários conforto ao rolamento e principalmente segurança ao longo de todo o trajeto (MOTTA, 2010, p. 403).

Segundo Motta (2010) analisando pela perspectiva dos usuários, o estado das camadas superficiais do pavimento é o mais importante, pois essas camadas são responsáveis por garantir o conforto do usuário ao trafegar. Qualquer defeito ou irregularidade encontrada nas camadas superficiais, afetam também as condições físicas dos veículos, ou seja, acarretam maiores custos operacionais, relacionados a gastos com a manutenção dos veículos. Desta forma, garantir a funcionalidade do pavimento significa economia nos custos de transporte, e nos custos de manutenção.

### **2.4.1 Causas dos defeitos**

Podemos dividir os defeitos em duas categorias, os defeitos estruturais e os defeitos funcionais. Segundo Yoder e Witczak (1975), os defeitos apresentados pelos pavimentos relacionados a condição estrutural está vinculada ao comprometimento da capacidade da estrutura de suportar as cargas solicitantes. Agora os defeitos funcionais refletem a capacidade do pavimento em garantir o conforto e a segurança aos usuários, podendo acontecer mesmo tendo a estrutura íntegra. Esses defeitos são considerados esperados e previstos pelo projeto, ou seja, quando o pavimento é projetado existem procedimentos de manutenção das vias ao longo de toda a sua vida útil, para corrigir esses defeitos. Essas manutenções garantem uma maior durabilidade da estrutura, por consequência garantem também a funcionalidade do pavimento.

Os erros que acarretam em problemas nas estruturas asfálticas podem ter diversas origens, mas de acordo com Motta (2010) dentre as possíveis origens se destacam os erros de projetos, problemas na produção dos materiais, erros na escolha do tipo de manutenção a ser realizada e inadequações construtivas. Analisando os erros de projetos, verificamos que a maior dificuldade encontrada pelos profissionais está na previsão do tráfego real que atuará durante toda a vida útil do pavimento. Essa dificuldade tem origem na ausência de dados de tráfego real, que impossibilita a previsão com certa precisão do crescimento de fluxo de veículos ao longo dos anos. Outra dificuldade encontrada está relacionada ao excesso de carga, que é praticado em muitas vias brasileiras que não possuem controle por balança.

Para minimizar ou consertar qualquer problema na estrutura, deve-se conhecer as possíveis origens desse defeito. Portanto, é recomendado que ocorra a verificação in situ dos problemas de superfície, juntamente com a obtenção de dados que forneçam informações pertinentes ao pavimento como dados climáticos, geotécnicos e de tráfego. Somente com uma análise conjunta de todos esses fatores, será possível avaliar soluções coerentes para a situação (MOTTA, 2010, p. 415).

### **2.4.2 Tipos de defeitos**

Existem diversos tipos de defeitos referentes aos pavimentos asfálticos, a norma DNIT 005/2003-TER cataloga diversos desses defeitos. Analisando as rodovias brasileiras, os principais defeitos que ocorrem são apresentados a seguir.

#### 2.4.2.1 Fenda

De acordo com o DNIT (2003), as fendas são quaisquer tipos de descontinuidade na superfície da estrutura, que acarretam aberturas de pequeno ou grande porte, podendo apresentar diversas formas. Esse defeito ocorre devido a tensões de tração.

Figura 8 – Fenda



Fonte: DNIT (2003).

#### 2.4.2.2 Afundamento

De acordo com o DNIT (2003) os afundamentos ou também conhecidos como deformações são patologias do asfalto caracterizadas pela depressão nas trilhas de roda. Podem ser causadas por resistência insuficiente da estrutura perante as solicitações.

Figura 9 – Afundamento



Fonte: DNIT (2003).

### 2.4.2.3 Ondulação

De acordo com o DNIT (2003) é o movimento plástico do pavimento, que corresponde a enrugamentos na superfície. A principal causa desse defeito está na falta de estabilidade da mistura asfáltica.

Figura 10 – Ondulação



Fonte: DNIT (2003).

### 2.4.2.4 Escorregamento

De acordo com o DNIT (2003) o escorregamento é caracterizado pelo aparecimento de fendas em formato de meia-lua. Esse defeito ocorre quando existe um deslocamento do revestimento perante a camada inferior da estrutura.

Figura 11 – Escorregamento



Fonte: DNIT (2003).

#### 2.4.2.5 Exsudação

De acordo com o DNIT (2003) corresponde ao defeito de deslocamento do material betuminoso na superfície do pavimento gerando um excesso de ligante em uma determinada região. Esse defeito cria um brilho vítreo na superfície. É causada por uso excessivo de material ligante no revestimento e também por baixa proporção de vazios.

Figura 12 – Exsudação



Fonte: DNIT (2003).

#### 2.4.2.6 Desgaste

De acordo com o DNIT (2003) o desgaste ocorre através da extração gradual dos agregados do revestimento, gerando um aumento do atrito entre o pavimento e as rodas dos veículos.

Figura 13 – Desgaste



Fonte: DNIT (2003).

#### 2.4.2.7 Panela ou buraco

De acordo com o DNIT (2003) é a desintegração da superfície do pavimento, gerando cavidades de tamanhos diversos. Podem ter diversas causas, alcançando as camadas inferiores do pavimento.

Figura 14 – Panela



Fonte: DNIT (2003).

#### 2.4.2.8 Remendo

De acordo com o DNIT (2003) o remendo é a atividade de preenchimento das panelas e buracos, apesar de ser uma atividade de conservação, é considerada uma patologia pois indica uma região de fragilidade além do fato de ocasionar um desconforto no rolamento.

Figura 15 – Remendo



Fonte: CNT (2018).

## 2.5 ANÁLISE EMPÍRICA MECANICISTA

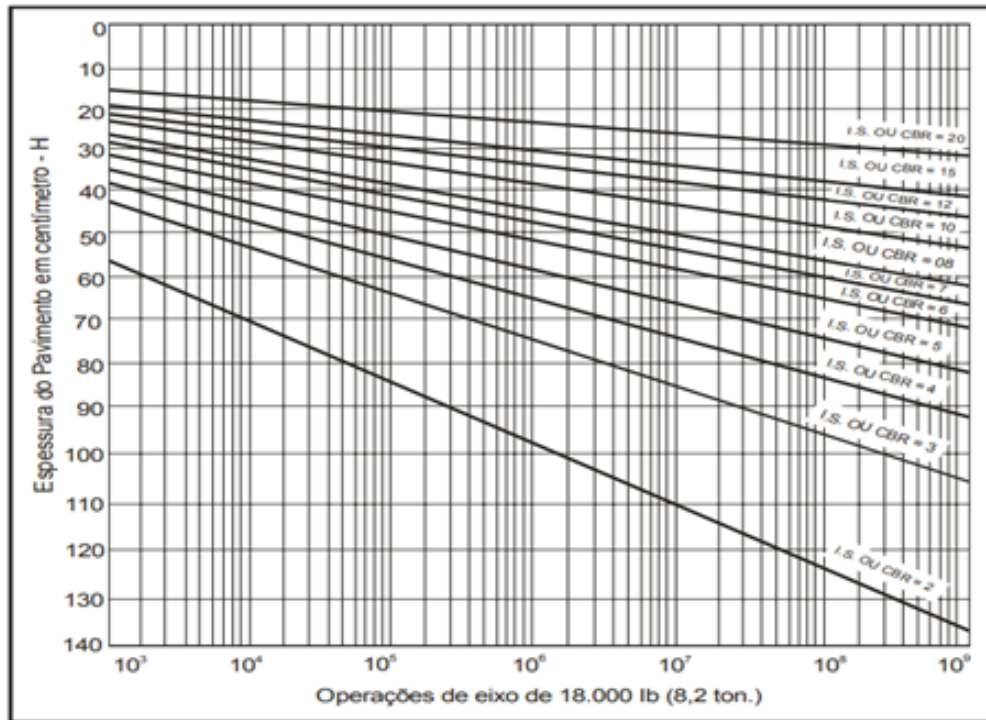
A análise mecanicista consiste na verificação do comportamento da estrutura e também no seu dimensionamento. A verificação estrutural avalia os deslocamentos, tensões e deformações nas camadas, prevendo como será o comportamento do pavimento ao longo de sua vida útil. O estudo é feito com o auxílio de softwares, alguns exemplos são Elsym 5, Mnlayer e MeDiNa. Para o trabalho atual foram utilizados os métodos empíricos de dimensionamento do DNER, juntamente com o software MeDiNa, para o cálculo do dimensionamento e para a verificação do comportamento do pavimento.

São necessários seguir alguns fundamentos para o emprego dos procedimentos que avaliam o potencial comportamento à fadiga de revestimentos asfálticos e de bases cimentadas. Deve-se verificar as deformações e as tensões nas estruturas, por meio de uma teoria adequada. Neste contexto, a Teoria Elástica de Sistemas de Camadas desenvolvida por Burmister em 1940, será empregada ao longo do trabalho. É necessário também a seleção de modelos semi-empíricos capazes de descrever o comportamento dos materiais em função do número de solicitações de carga.

A análise crítica do projetista ao longo das verificações é vital para o projeto. É aconselhável tomar como base a variabilidade dos parâmetros dos materiais em função do posicionamento do tráfego e das condições climáticas. As análises acima descritas devem ser realizadas consecutivamente, aplicando as hipóteses de dano contínuo e linear de *Palmegren-Miner*. De acordo com as instruções de projeto da PMSP (2004), esse processo é realizado por meio do aumento gradativo das espessuras das camadas sujeitas à fadiga, este incremento nunca deve ser negativo em comparação a estrutura projetada.

O método empírico do DNER é baseado no valor obtido pelo ensaio de CBR do material do subleito, em conjunto com a caracterização do tráfego previsto para o pavimento. Esses valores serão plotados no ábaco fornecido pelo DNER, apresentado pela figura 16. As camadas de Base e Subbase são dimensionadas levando em consideração os valores mínimos de CBR para essas camadas, sendo elas iguais à 20% e 80% respectivamente (CAVA, 2008, p. 1). Esse ábaco fornece a espessura equivalente em cm para o pavimento proposto. Esse processo por si só não é o suficiente para garantir a durabilidade e a qualidade do pavimento. Por isso, se faz necessária a junção do método de dimensionamento empírico com os softwares de análise mecanicistas.

Figura 16 – Ábaco para determinação de espessuras do pavimento



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006).

A análise mecanicista do software MeDiNa necessita de um conjunto de informações confiáveis, obtidos através dos ensaios dos materiais. Esses dados obtidos dos ensaios serão elencados aos cálculos realizados pelo software para a análise do pavimento.

Os materiais naturais utilizados para a construção das vias nas camadas de base, subbase e reforço do subleito, devem ter suas propriedades obtidas em ensaios laboratoriais. As principais propriedades necessárias para o estudo são o módulo e a deformação permanente de cada matéria-prima. Já os materiais provenientes de usinas ou centrais, podem ter seus valores definidos por projeto. O programa MeDiNa, possui um pequeno banco de dados que pré-estabelece alguns valores desses materiais. As misturas asfálticas e os solos estabilizados com cimento são alguns exemplos de insumos que se adequam a esse grupo.

Um dado importante destacado pelo manual de utilização do programa, está vinculado a sensibilidade do mesmo a pequenas variações do número equivalente de eixos, o número N. Portanto, é recomendado um estudo apurado para a obtenção desse valor, antes da realização da análise mecanicista. É essencial seguir essas informações para o sucesso do projeto.

O programa MeDiNa, é fornecido de maneira gratuita pelo DNIT em parceria com a UFRJ. O software se encontra em fase Beta, ou seja, está ainda em fase de testes. Ao longo do seu manual, ressalta-se sempre que os resultados fornecidos pelo programa serão tão

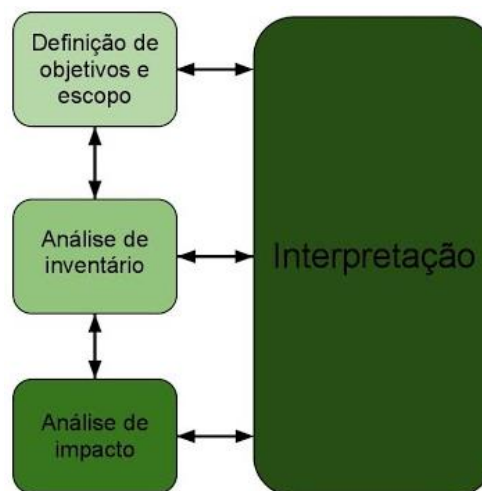
confiáveis quanto os dados de entrada fornecidos pelo usuário. Dessa forma, fica claro a necessidade dos ensaios laboratoriais dos materiais, assim como a necessidade da realização de testes adequados e de boa qualidade. Não é recomendável realizar o dimensionamento de uma obra partindo de dados bibliográficos.

## 2.6 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A ACV (Análise do Ciclo de Vida) corresponde a uma metodologia que analisa os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço, investigando todas as etapas presentes em sua vida útil. O ciclo de vida de um produto ou serviço se refere a todas as etapas inerentes ao mesmo, desde a extração das matérias-primas, passando pelo processamento do material, fabricação, distribuição, uso e chegando ao fim da sua vida útil (KAKAZU, 2015). A ACV também é conhecida como a análise “berço ao túmulo”, justamente por averiguar todas as etapas do produto, ajudando a evitar uma visão restrita sobre questões ambientais.

Os procedimentos de ACV são regidos pelas normas de gestão ambiental ISO 14000: ISO 14040:2006 e na 14044:2006. De acordo com essas normas, uma análise do ciclo de vida é executada em quatro etapas distintas, como demonstrada na figura 17. Essas etapas podem ser muitas vezes correlatas, de forma que os resultados de uma fase encaminham as demais fases a serem concluídas. As etapas consistem na definição de objetivos e escopo, análise de inventário, análise de impacto e interpretação.

Figura 17 – Fases e fluxos de uma análise do ciclo de vida



Fonte: Quiumento (2011).

A definição de objetivos e escopo de acordo com Quiumento (2011) está relacionado ao momento em que se estabelecem as fronteiras de análise e as variáveis de estudo. As variáveis mais comuns nos estudos de ACV são as emissões de poluentes como metano, dióxido de carbono e os óxidos de nítricos, e os consumos de água e energia no processo. Uma análise do ciclo de vida coerente, deve possuir um objetivo claro, tendo um contexto de estudo e um alvo para quem os resultados devem ser comunicados.

A análise de inventário é caracterizada pela fase de coleta de dados que caracterizam o ciclo de vida do produto. Essa etapa depende da identificação e quantificação das entradas de matéria e energia no sistema, que foi delimitado pela fase anterior. Os resultados obtidos são denominados ICV, inventário do ciclo de vida. De acordo com a norma ISSO 14041 (1998) o ICV fornece dados sobre todas as entradas e saídas de todos os processos, essa informação é relatada em forma de fluxo elementar para o ambiente.

A análise de impacto de acordo com a ISO 14040 (2006) consiste na avaliação dos potenciais impactos ambientais oriundos das entradas identificadas pela ICV. Nessa etapa, os fluxos estabelecidos são convertidos através da multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência. Os resultados desses cálculos são transformados em unidades comuns, como por exemplo, CO<sub>2</sub> equivalente em kg.

Ao longo de todas as etapas é essencial identificar as questões significativas do estudo, assim como as consistências dos resultados obtidos. Portanto, a metodologia ACV necessita de interpretações constantes das respostas obtidas. A fase de interpretação é essencial para a determinação do nível de confiança nos resultados finais, transmitindo uma informação coerente, precisa e completa. Uma parte relevante da interpretação está na avaliação da sensibilidade de cada elemento no resultado final.

Todas as etapas apresentadas possuem uma ordem de realização, contudo essa ordem pode sofrer alterações constantes ao longo de todo o processo. A cada etapa realizada deve ser interpretada, podendo sofrer alterações de acordo com o resultado ou com relação a sua coerência e importância. Essa característica de ordem volátil de uma análise do ciclo de vida é extremamente importante para a sua realização.

“A validade dos dados é uma preocupação permanente em análises de ciclo de vida” (QUIUMENTO, 2011). Desse modo, os dados utilizados para a realização da análise devem ser precisos e atuais. Atualmente as pesquisas e os processos produtivos vivem em constante melhoria e adaptação, portanto os dados devem ser atuais para que sejam condizentes com a realidade. Isso dificulta o processo de ACV de um produto, pois as constantes mudanças

tornam os dados incondizentes. A validade dos dados depende de revisões sobre os processos, e da determinação da atualidade das informações coletadas.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Os projetos de estudos de ACV voltados para pavimentos asfálticos podem ser feitos de duas maneiras distintas. A primeira maneira se caracteriza por utilizar dados de projetos reais de pavimentação, a segunda maneira possível se baseia na utilização de dados de um projeto hipotético. As duas maneiras possuem pontos positivos e negativos. O estudo de ACV realizado nesse trabalho propõe-se a analisar um trecho hipotético de pavimento asfáltico. Esse método permite analisar casos genéricos que trazem resultados importantes para possíveis avaliações futuras.

O estudo terá como base um trecho hipotético de pavimento asfáltico. Contudo, alguns dados necessários para a realização do trabalho como a geometria do trecho, o tráfego, a seção transversal típica da estrutura do pavimento e a vida útil de projeto, foram obtidas de um projeto real no interior do estado de São Paulo. Assim como alguns dados laboratoriais, que foram fornecidos pela concessionária Nova Dutra, através de ensaios realizados em seus laboratórios.

O trabalho consiste na comparação entre dois pavimentos semirrígidos invertidos, o primeiro produzido com materiais virgens em todas as suas camadas e o segundo utilizará material fresado nas camadas de sub-base de seu pavimento. Serão desenvolvidos ao longo do trabalho o dimensionamento da estrutura juntamente com a verificação mecanicista dos dois pavimentos semirrígidos e a análise do ciclo de vida comparativa entre eles. Posteriormente, com os dados obtidos serão avaliados os impactos ambientais e a viabilidade técnica do pavimento com presença de material fresado em sua estrutura.

#### 3.1 MÉTODOS

Os ensaios laboratoriais são essenciais para a qualidade final da obra. Os testes realizados com os materiais fornecem as informações necessárias para a execução das análises mecanicistas do pavimento. Portanto, para o dimensionamento das estruturas dos pavimentos é utilizada os dados obtidos através desses ensaios. Os ensaios apresentados a seguir, foram realizados pela Concessionária Nova Dutra para a avaliação das matérias-primas por ela fornecida.

### 3.1.1 Índice de Suporte California (*California Bearing Ratio*)

Segundo Bernucci (2006, p.342) o Índice de Suporte California é a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial”. Esse material padrão se refere aos melhores materiais granulares dos pavimentos californianos no período da década de 1920. A média de resistência à penetração desses materiais foi adotada como o valor padrão para o índice de suporte califórnia. O procedimento do ensaio é regido no Brasil pela norma DNER-ME 049/94.

O ensaio consiste em três etapas fundamentais, que são a moldagem, seguido da imersão e a penetração do corpo de prova. A figura 18 ilustra todas as etapas deste ensaio. A moldagem é realizada com o material passado na peneira  $\frac{3}{4}$ , tendo a massa específica e a umidade definidas pelo projeto. A imersão por sua vez, possui a duração de quatro dias, sendo empregada ao longo de todo o período uma sobrecarga padrão de 10lbs. A penetração do corpo de prova é realizada posteriormente a imersão, no qual um pistão padrão é puncionado no corpo de prova com uma velocidade também padrão. Nesse ensaio é obtido o valor de índice de suporte califórnia do material que é expresso em porcentagem.

Figura 18 – Ensaio CBR: (a) Compactação; (b) Imersão; (c) Ensaio penetrométrico



(a)



(b)



(c)

Fonte: Motta (2010).

### 3.1.2 Resistência à Compressão Simples

Segundo Bernucci (2006, p.351), “é determinada aplicando-se um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos-de-prova cilíndricos, preferencialmente com altura de pelo menos duas vezes seu diâmetro”.

Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: Motta (2010).

### 3.1.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral é regido pela norma ABNT NBR 15087/2004, que define os equipamentos e os procedimentos a serem realizados. De forma simplificada, o ensaio consiste na aplicação de duas forças diametralmente opostas e concentradas em um corpo de prova cilíndrico de dimensões definidas. O procedimento pode ser dividido em algumas etapas, sendo elas a medição da altura e do diâmetro do corpo de prova, o repouso do cilindro na geratriz por quatro horas sob uma temperatura controlada, o ajuste do material na prensa e pôr fim a aplicação da carga progressivamente até que ocorra a ruptura. Com esse ensaio é obtido o valor de carga de ruptura.

Figura 20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Motta (2010).

### **3.1.4 Módulo Dinâmico**

A norma AASHTO T 342/11 – Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA) descreve como deve ser realizado os procedimentos do ensaio para obtenção do módulo dinâmico. Ressalta-se que no Brasil não existe ainda uma norma que regulamenta este ensaio, sendo preciso a utilização em procedimentos especificados em normas de outros países. O objetivo do ensaio consiste na aplicação de forças axiais de compressão do tipo senoidal, em um corpo de prova que deve ter um formato cilíndrico. Ao longo do ensaio, serão alteradas a temperatura e a frequência de carregamento ao qual o cilindro estará sujeito. A aparelhagem essencial para a realização do ensaio, compõe-se em uma prensa, um sistema de obtenção de dados e uma câmara de controle de temperatura.

O ensaio fornece valores de módulo dinâmico medidos em diversas temperaturas e frequências, que serão utilizadas para avaliar o desempenho do material. Esses valores obtidos serão ajustados em uma curva mestra. Essa curva é útil para o dimensionamento de pavimentos nos métodos mecanístico-empíricos.

## **3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO**

O projeto de rodovia desenvolvido ao longo do trabalho utilizou dos procedimentos, critérios e padrões mínimos adotados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo, o DER-SP.

### **3.2.1 Tipo de pavimento**

O pavimento proposto corresponde a um pavimento semirrígido, que possui revestimento asfáltico e camadas de base e sub-base em material estabilizado com adição de cimento. O pavimento será do tipo indireto ou também conhecido como invertido, que significa que a camada de revestimento é executada sobre a camada de base granular e sub-base cimentada.

### **3.2.2 Etapa do projeto**

Para a realização de um projeto de pavimentação é necessário realizar três etapas de estudos. As etapas são definidas pelo DER-SP, e são descritas como o estudo preliminar, o

projeto básico e o projeto executivo. Essas etapas devem ser realizadas nessa ordem e correspondem ao período em que se encontra o desenvolvimento da rodovia.

O estudo preliminar de acordo com o DER-SP (2006) representa a etapa inicial da rodovia, consiste na concepção geral do pavimento, tendo como base os dados de cadastro regionais e locais, observações de campo e também por conhecimento técnico de obras anteriores, permitindo uma previsão inicial da estrutura e de seus custos. A análise dos dados e obtidos nessa etapa, juntamente com o conhecimento técnico são essenciais para a etapa de projeto posterior, o projeto básico.

Na etapa do estudo preliminar é necessário apresentar um memorial descritivo com apresentação das estruturas e seu pré-dimensionamento, assim como o desenho da seção-tipo do pavimento, e o quantitativo dos serviços de pavimentação. O acompanhamento técnico-econômico e o orçamento preliminar também são realizados nessa etapa de estudo preliminar.

O projeto básico de acordo com o DER-SP (2006) corresponde a etapa de estudo das alternativas fornecidas pela etapa anterior. Portanto, essa etapa deve apresentar um maior grau de detalhamento que permite as comparações entre as opções estudadas. Assim, a etapa do projeto básico define qual é a melhor solução técnica e econômica para o desenvolvimento da rodovia.

Nessa etapa devem ser apresentado o memorial de cálculo com análise geológico-geotécnica, pesquisa de tráfego e cálculo do número "N". Devem ser demonstrados também o dimensionamento da estrutura com verificação mecanicista, o desenho da seção-tipo e a planta de localização. A orçamentação os serviços e dos materiais também são realizados nessa etapa.

Por fim é desenvolvido o projeto executivo, que segundo as instruções de projetos do DER-SP (2006) consiste no acompanhamento da solução selecionada na etapa do projeto básico. Ou seja, o projeto executivo deve detalhar os dados atualizados obtidos em campo, como a topografia, as investigações geológicas e geotécnicas, o projeto geométrico, o projeto de drenagem.

O atual trabalho será realizado elaborando um projeto de um pavimento nas etapas de estudo preliminar e de projeto básico. Contudo, não serão realizadas todas as análises dessas etapas, pois não está relacionado ao objetivo principal deste trabalho.

### **3.2.3 Normas aplicadas**

Para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis e de pavimentos semirrígidos na etapa do estudo preliminar, é adotado o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP. Nas etapas dos projetos básico e executivo, é adicionado o método de resiliência constante no Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

A verificação mecanicista da estrutura pode ser realizada através da utilização de programas computacionais. Para a utilização desses softwares, devem ser descritas e fornecidas de forma sucinta a descrição do programa, as hipóteses de cálculo nos quais ele baseia-se e os dados de entrada e os resultados obtidos.

Para a escolha de um pavimento semirrígido como melhor alternativa, o DER/SP recomenda que o número “N” de equivalentes de operações de eixo seja igual ou superior a  $5 \times 10^7$ .

#### **3.2.4 Classe da rodovia**

Partindo dos critérios de classificação de rodovias do DNIT, o pavimento analisado é pertencente a classe I-A com pista dupla e controle parcial de acessos. As vias desta categoria não possuem nenhuma intersecção em nível. Em outras palavras, não apresentam cruzamentos, os pontos de parada de ônibus devem ser realizados em faixas fora da rodovia, faixas de pedestres não podem cruzar a via, o estacionamento é terminantemente proibido. A circulação de bicicletas, veículos de tração animal e pedestres também são proibidas.

Quadro 1 – Classificação das Rodovias

CLASSE DE PROJETO	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA	VELOCIDADE DE PROJETO POR REGIÃO (km/h)		
			Plana	Ondulada	Montanhosa
<b>0</b>	Via Expressa – controle total de acesso	Decisão administrativa	120	100	80
<b>I</b>	<b>A</b> Pista dupla – Controle parcial de acesso	O volume de tráfego previsto reduzirá o nível de serviço em uma rodovia de pista simples abaixo do nível “C”	100	80	60
	<b>B</b> Pista simples	Volume horário de projeto VHP > 200 Volume médio diário VMD > 1400			
<b>II</b>	Pista simples	Volume médio diário VMD 700 - 1400	100	70	50
<b>III</b>	Pista simples	Volume médio diário VMD 300 - 700	80	60	40
<b>IV</b>	Pista simples	Volume médio diário VMD < 300	80 – 60	60 – 40	40 – 30

Fonte: DNIT – critérios de classificação de rodovias (2006).

### 3.3 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

As investigações são realizadas de acordo com as necessidades de detalhamento das etapas em que o projeto se encontra. Neste trabalho será realizado as investigações voltadas para a etapa do estudo preliminar de uma rodovia, visto que as etapas de projeto básico e executivo demandam ensaios de campo para obtenção dos dados das áreas de construção da rodovia e das regiões de empréstimo de material.

As investigações voltadas para o estudo preliminar estão relacionadas as informações provenientes de mapas geológicos, dados hidrológicos da região, mapa pedológicos e se possíveis informações de obras anteriores realizadas na área de influência da rodovia. Além da coleta dos dados citados, é necessário a vistoria no campo por profissionais da área para averiguar as reais condições geológicas da região, além da verificação das áreas de empréstimo de material.

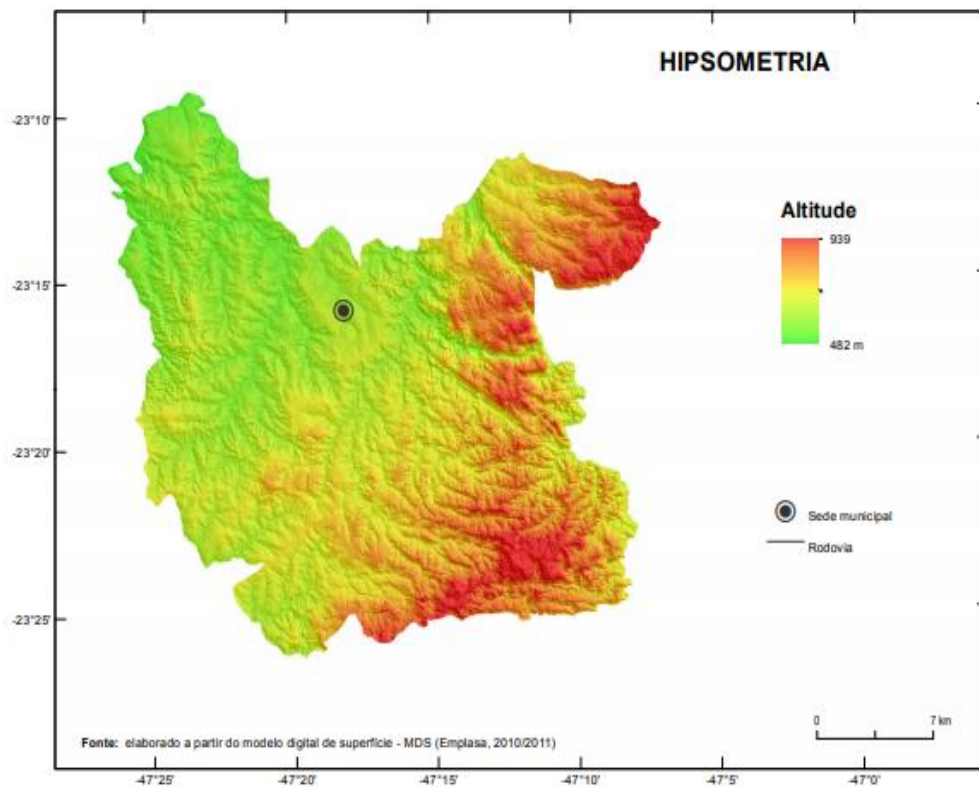
Ao longo da vistoria de campo deve-se coletar dados básicos relevantes para a elaboração do estudo das possíveis alternativas construtivas da rodovia. O DER/SP recomenda que seja coletada as seguintes informações mínimas para o estudo preliminar:



### 3.3.2 Verificação topográfica

A figura 22 abaixo, refere-se ao mapa hipsométrico da região do município de Itu. Esse mapa foi fornecido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Podemos observar que na região em que a rodovia está localizada, não existe uma grande variação altimétrica, o que facilita a construção e concepção da rodovia.

Figura 22 – Mapa hipsométrico da região de Itu



Fonte: Emplasa (2010).

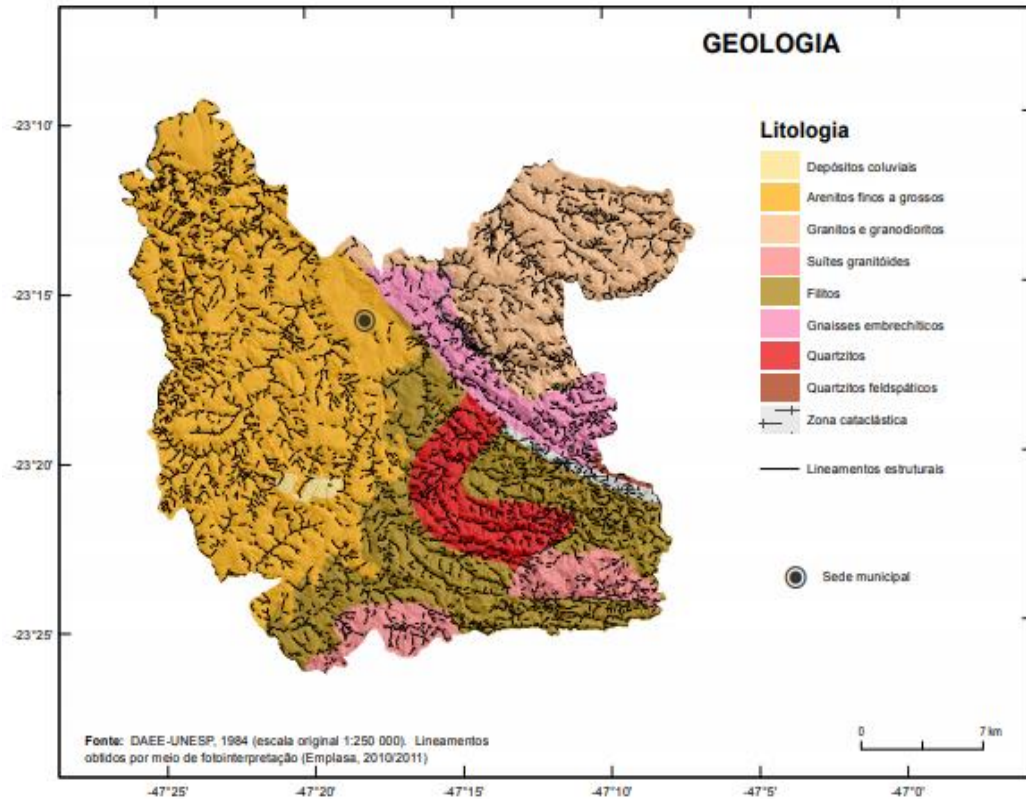
### 3.3.3 Verificação geológica

A figura 23 abaixo, também foi obtida no banco de dados da CPRM. Esse mapa geológico do município de Itu permite uma análise dos materiais geológicos presentes nos trechos em que a rodovia está localizada.

Para a verificação do trecho aproximado da rodovia é necessário comparar as figuras 21 e 23. Feito essa comparação percebemos que o solo presente no subleito é em sua maioria constituído de arenitos finos a grossos e uma parte de filitos. Essa verificação é extremamente importante para a determinação da capacidade de suporte do subleito. Visto que as

informações referentes a etapa de vistoria de campo não serão realizadas ao longo deste trabalho.

Figura 23 – Mapa geológico da região do município de Itu



Fonte: DAEE-UNESP (1984).

### 3.3.4 Materiais

Os materiais que serão utilizados para a construção da rodovia devem seguir as especificações técnicas do DER/SP. Os materiais que são extraídos da natureza devem ser testados e qualificados através de ensaios laboratoriais para a determinação de suas características. Já os materiais que possuem um tratamento e são oriundos de indústrias, podem ser quantificados e qualificados antes de sua produção, visto que existe um controle da qualidade e das características desses materiais.

A seguir são expostas as prescrições recomendadas pela norma para cada material constituinte das camadas dos pavimentos.

#### 3.3.4.1 Solos do subleito

A camada de subleito deve apresentar algumas propriedades geotécnicas para ser aceita pela norma do DER/SP. A primeira propriedade a ser analisada é a capacidade de suporte determinada pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), ela deve ser superior ou igual a 2%. A segunda propriedade analisada é a expansão máxima do material, que não deve ser superior a 2%. E por fim o grau de compactação mínimo deve ser de 100% nos ensaios de Proctor Normal, em casos de análise de solos finos lateríticos ou solos granulares como os apresentados na região analisada, pode ser adotado o grau de compactação mínimo de 100% no ensaio de Proctor Intermediário.

#### 3.3.4.2 Reforço do subleito

Devem apresentar uma expansão máxima de 1%, e devem ISC superior ao do subleito. Recomenda-se que esses solos apresentem comportamento laterítico e estejam classificados como LA, LG' e LA' na classificação MCT proposta por Nogami & Villibor (Figura 7).

#### 3.3.4.3 Sub-base e base

Independentemente dos materiais utilizados nas camadas de sub-base, todos eles devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas, capacidade de suporte determinada pelo ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) igual ou superior a 30% e uma expansão máxima de 1% do material.

Os materiais empregados na camada de base do pavimento devem apresentar por sua vez, capacidade de suporte, ISC igual ou superior a 80% e uma expansão máxima de 1% do material.

A norma recomenda que para a utilização de brita graduada tratada com cimento, esse material deve apresentar resistência característica à compressão simples, determinada aos 28 dias, um valor dentro do intervalo de 4,0 Mpa a 6,2 Mpa. A resistência a tração indireta obtida através do ensaio de compressão diametral, também avaliada aos 28 dias, deve estar no intervalo de 0,7 Mpa a 1,0 Mpa.

#### 3.3.4.4 Camada de rolamento e de *Binder*

As camadas de rolamento e a camada de *Binder* devem atender, obrigatoriamente, às determinações técnicas do DER/SP. O Departamento de estradas de rodagem de São Paulo fornece a norma de concreto betuminoso usinado a quente, que estabelece todos os critérios necessários para a execução dessas camadas.

Segundo o DER-SP (2006) o ligante asfáltico deve ser constituído de petróleo do tipo CAP 30-45, CAP 50-70 e CAP 85-100, atendendo a especificação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível – ANP. Todo o carregamento que for utilizado na obra deve apresentar, por parte do fabricante, um certificado dos resultados de análise dos ensaios técnicos realizados. Além dessas informações, o certificado deve possuir a procedência do material, o tipo e a quantidade e a distância percorrida entre a fábrica até o canteiro de obras.

Os agregados utilizados nessas camadas também devem analisadas. Elas precisam apresentar partículas sãs, desprovido de torrões de argila ou qualquer outra partícula nociva. Os agregados graúdos devem ser formados de pedras britadas ou seixos de rolados britado, os agregados miúdos por sua vez devem ser constituídos de areia, pó de pedra ou a mistura desses dois materiais.

### 3.4 DADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios foram realizados pela Concessionária da Rodovia Presidente Dutra S.A.. Abaixo podemos analisar os resultados obtidos através dos ensaios de propriedades mecânicas.

Foram feitos três ensaios nos corpos de prova utilizando o material da sub-base. Os corpos de provas eram constituídos de BGTC com teores de 2% e 3% de cimento, e apresentam os teores de 0% e 63% de presença de material fresado (Recycled Asphalt Pavement). Foram efetuados os ensaios de Resistência a compressão simples, Resistência à tração por compressão diametral e por fim o ensaio de Módulo Dinâmico à 10Hz. Por conta da presença do cimento nos corpos de prova, foi necessário acompanhar os resultados ao longo de um período de 28 dias, referentes a cura do cimento. Os gráficos de resistência à compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral representados na figura 24, e o gráfico do módulo dinâmico representado na figura 25, possuem plotados 3 pontos para cada corpo de prova, sendo o primeiro aos 3 dias, o segundo aos 7 dias de cura e o ultimo aos 28 dias, possibilitando assim a análise da resistência da estrutura ao longo do

tempo de cura do cimento. O Quadro 2 apresenta os valores obtidos através dos ensaios realizados para cada mistura nos corpos de prova.

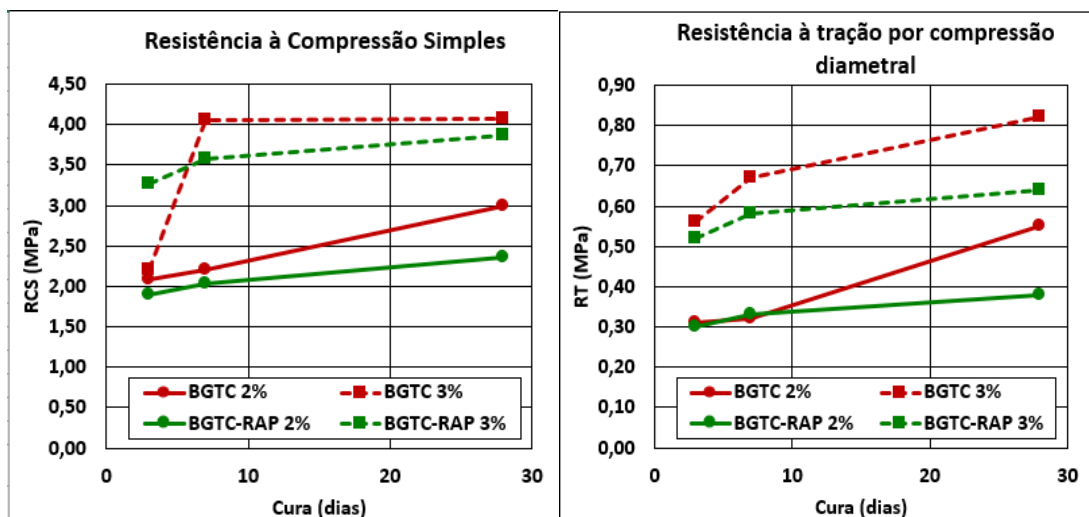
Quadro 2 – Dados dos ensaios

Mistura	Teor de Cimento (%)	Teor de RAP (%)	Resistência à Compressão Simples (MPa)			Resistência à Tração por Compressão diametral (MPa)			Módulo Dinâmico @10Hz(MPa)		
			3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
BGTC 2%	2	0	2,09	2,21	3,00	0,31	0,32	0,55	3.552	3.940	4.943
BGTC 3%	3	0	2,21	4,05	4,08	0,56	0,67	0,82	7.196	12.094	12.231
BGTC-RAP 2%	2	63	1,9	2,04	2,36	0,30	0,33	0,38	3.808	4.712	5.176
BGTC-RAP 3%	3	63	3,26	3,57	3,87	0,52	0,58	0,64	7.627	7.675	8.970

Fonte: Produção do próprio autor.

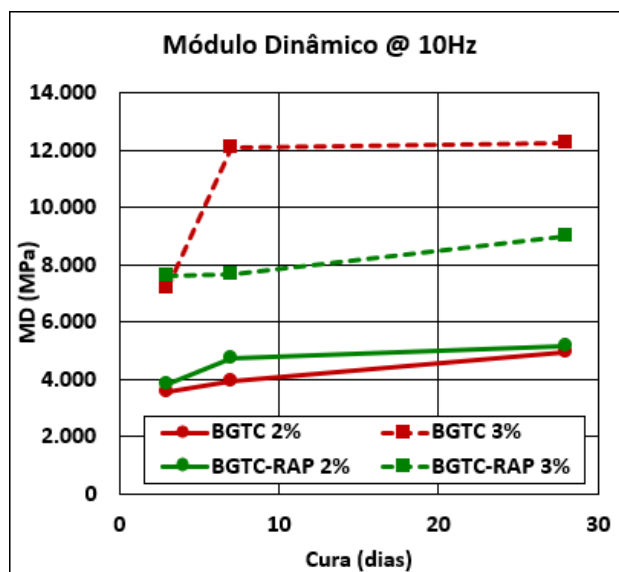
Nas figuras 24 e 25 estão exibidos os gráficos de cada ensaio:

Figura 24 – Gráficos de resistência à compressão e a tração



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 – Gráfico do módulo dinâmico



Fonte: Produção do próprio autor.

Através dos dados obtidos, percebemos que os corpos de prova que possuem uma porcentagem de 3% de cimento em peso são mais resistentes à compressão e à tração em todos os ensaios, ao longo do tempo de cura. Contudo os valores apresentados pelos corpos de prova que possuem a porcentagem de 63% de RAP em sua composição, são muito próximos aos recomendados na norma do DER/SP, porém estando abaixo do limite mínimo necessário para a sua utilização. Os limites recomendados para os valores de compressão simples, avaliada aos 28 dias de idade, devem estar no intervalo de 4,0 MPa até 6,2 MPa, enquanto os valores de resistência à tração indireta medidos pelo ensaio de compressão diametral, também avaliada aos 28 dias, deve estar no intervalo de 0,7 MPa até 1,0 MPa. Os valores obtidos pelos ensaios, mostrados na tabela 3, mostra que o valor da compressão simples é igual a 3,87 MPa e o valor de compressão diametral possui valor 0,64 MPa, ficando fora do limite recomendado pela norma.

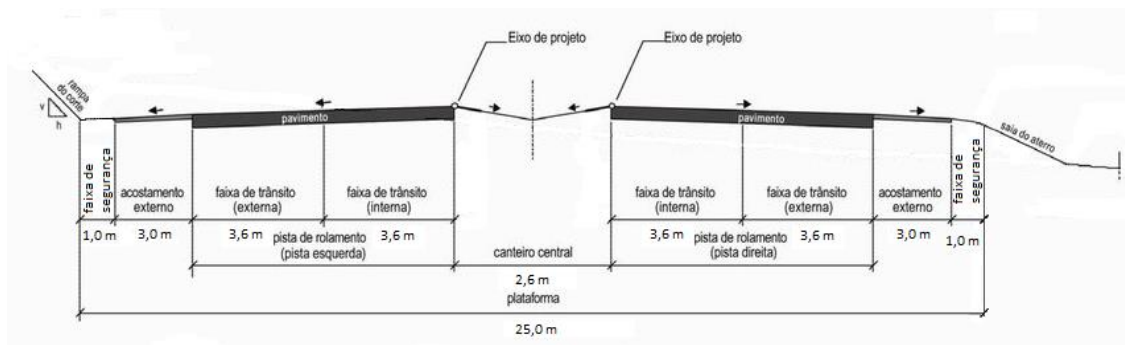
Portanto, para o desenvolvimento deste trabalho, será adotado os valores mínimos recomendados pela norma. Este valor será utilizado para as análises de dimensionamento do pavimento ao longo do trabalho. Em relação ao material fresado, será adotado uma quantidade igual a 63%, referente a quantidade presente nos corpos ensaiados pela CCR NovaDutra.

### 3.5 CRITÉRIOS DE CÁLCULO ESTRUTURAL

#### 3.5.1 Concepção da estrutura do pavimento

O pavimento será voltado para uma construção de uma rodovia estadual, do tipo semirrígido e de classe I-A (Pista Dupla – controle parcial de acesso) como podemos observar no Quadro 1 de classificação de rodovias fornecidas pelo DNIT. O pavimento apresenta pista dupla com 2 faixas por sentido, cada faixa possui a largura de 3,6 metros, a estrutura também possui acostamentos nos dois sentidos, cada um com largura de 3,0 metros e faixas de segurança com 1,0 metro de largura cada. A figura 26 representa a vista horizontal do pavimento em estudo. A rodovia terá um total de 10,0 km de extensão.

Figura 26 – Vista horizontal da rodovia



Fonte: Adaptado de Lee (2005).

O período do projeto será referente a 10 anos de uso sem reformas durante esse momento. Será adotado uma taxa de crescimento de 3% ao ano relacionado ao tráfego. Também deverá ser instituído uma porcentagem de veículos que usarão uma faixa específica do pavimento, aumentando assim a sua solicitação ao longo dos anos, esse valor foi estabelecido como 50% do tráfego total de veículos passantes.

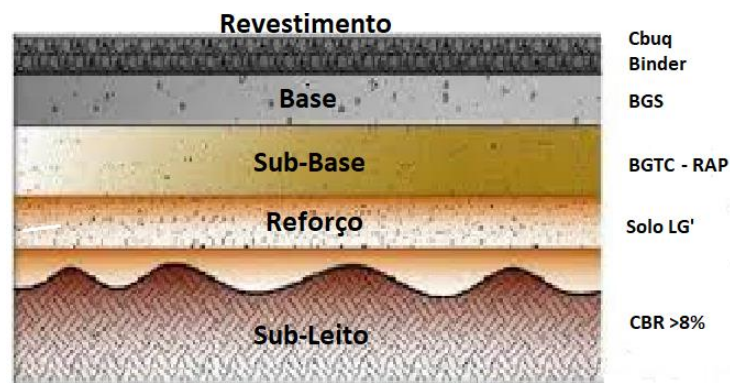
##### 3.5.1.1 Perfil da estrutura

Para o dimensionamento da estrutura semirrígida utilizada no estudo em questão, foi empregado o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP. Essa ferramenta pode ser utilizada para o dimensionamento dos pavimentos semirrígidos na etapa

de estudo preliminar do projeto. Esse método de dimensionamento tem como base o método do DNER de 1966, com algumas alterações.

A espessura total do pavimento é determinada através do seu valor de CBR, no qual é plotado no ábaco fornecido pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) que apresenta o valor referencial para o dimensionamento. Após obtido esse valor, é necessário realizar os procedimentos e critérios fornecidos pelo DER/SP para o cálculo das espessuras de cada camada do pavimento. Em seguida, essa unidade estrutural obtida foi analisada de forma mecanística fundamentada no cálculo de tensões e deformações e deslocamentos da estrutura através do Software MeDiNa.

Figura 27 – Estrutura do pavimento



Fonte: Adaptado de Marques (2007).

A estrutura analisada trata-se de um pavimento semirrígido invertido, que possui uma camada de revestimento, sendo uma parte de revestimento em CBUQ sobre uma camada de revestimento composta por Binder, também denominada de camada de ligação. O revestimento está assentado sobre uma base de BGS (brita graduada simples), e logo abaixo temos a camada de sub-base composta por BGTC (brita graduada tratada com cimento) com adição de 3% de cimento em peso, com resistência a compressão simples superior a 3,5 Mpa aos 7 dias. A camada de sub-base terá modificações de um modelo para o outro, pois será adicionado uma quantidade igual a 63% de RAP (recycled asphalt pavement) em peso em um dos modelos propostos. Seguindo a descrição da estrutura, temos uma camada de reforço do sub-leito composta por solo argiloso de comportamento laterítico, e por fim a camada de subleito que possui um CBR mínimo de 8% e espessura semi-infinita, como demonstrada na figura 27.

### 3.5.2 Parâmetros de projeto

#### 3.5.2.1 Capacidade de suporte do subleito

Para a determinação da capacidade de suporte do subleito é necessário realizar os ensaios de penetração, denominado de Índice de Suporte California (ISC). Para os critérios de dimensionamento de pavimento é necessário obter o valor de capacidade de suporte de projeto, que corresponde aos valores de ISC dos vários segmentos homogêneos da rodovia analisada. Para cada trecho é determinado o seu valor de ISC, que serão utilizados para a determinação do ISC<sub>p</sub> correspondente ao valor de capacidade de suporte de projeto através da seguinte inequação (1) matemática:

$$ISC_p = \overline{ISC} - \frac{\sigma \times t_{0,90}}{\sqrt{n-1}} \quad (1)$$

Onde:

$\overline{ISC}$  : média aritmética dos valores de Índice de Suporte California dos “n” ensaios;

$t_{0,90}$  : coeficiente de Student com intervalo de confiança igual a 90%;

$\sigma$  : desvio padrão dos “n” ensaios de Índice de Suporte California;

Para os pavimentos semirrígidos, é necessário classificar o solo do subleito quanto à resiliência. Visto que essa classificação é essencial para o cálculo do dimensionamento do pavimento pelo método da resiliência. O Quadro 3 mostra a classificação do DER/SP dos solos finos à resiliência. A coluna do ISC (%) representa o intervalo do Índice de Suporte California do subleito, e a Coluna S (%) representa por sua vez a porcentagem de material que passa na peneira de abertura de 0,075 mm (#200).

Quadro 3 – Classificação da Resiliência dos solos

ISC (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Fonte: DER/SP (2006).

Os solos são classificados, de acordo com o DER/SP em três categorias distintas:

- Tipo I: Solos com bom comportamento para subleito e reforço do subleito devido ao baixo grau de resiliência do material;
- Tipo II: Solos com comportamento regular como subleito, apresentando grau de resiliência intermediário, sendo necessário um estudo mais aprofundado para a sua utilização como material de reforço do subleito;
- Tipo III: Solos com grau de resiliência elevado, não recomendados para a utilização nas camadas do pavimento. A sua utilização como camada de subleito deve ser analisada de forma mais aprofundada;

Algumas considerações foram adotadas para caracterizar de forma adequada o subleito. Para toda a estrutura será considerado o apoio sobre o subleito compactado com 100% de energia no Proctor normal, atingindo um valor de ISCP de 8% e expansão inferior a 2%.

Para a classificação do subleito com relação a sua resiliência, será dotado o solo do tipo II, tendo como base as análises obtidas através dos estudos geológicos na região de Itu, mostrada na figura 23.

#### 3.5.2.2 Tráfego

O cálculo do volume de tráfego é realizado através da contagem de tráfego real característica de cada região. Cada projeto rodoviário possui o seu estudo de tráfego. A determinação desses dados é de extrema importância para a análise mecanicista, pois os Softwares e as equações de previsão são sensíveis as mudanças de valores de tráfego. Tendo isso em pauta, os dados fornecidos na tabela abaixo, foram obtidos analisando um período de projeto de 10 anos de uma rodovia real, a SP-280 no interior do estado de São Paulo, mais especificamente no município de Itu. A obtenção desses valores reais se faz necessário pois eles possuem grande influência no decorrer do trabalho e na determinação nas dimensões das camadas estruturais. A localização da contagem foi feita no Município de Itu no Km 74, durante um período de 24 horas no ano de 2015. Esses dados foram obtidos através do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo.

Os dados foram obtidos de uma via do tipo sistema arterial primário, caracterizada por desembocar em um sistema arterial principal. Cada sistema possui seu coeficiente de segurança com relação aos números mensuradas, isso é fundamentado na precisão do controle. Um sistema arterial primário possui 80% de fator de segurança. O volume médio diário de veículos (VMD) de passeio é igual a 24.784, e 9.253 para o VMD de veículos comerciais. Os automóveis de passeio possuem carga de magnitude desprezível em comparação aos veículos comerciais de acordo com o DER/SP, portanto para o cálculo do número “N” de equivalentes de operações de eixos simples padrão de rodas duplas de 80 kN será utilizado apenas os valores referentes ao VMD de veículos comerciais.

Para a determinação do número “N”, é necessário classificar os veículos comerciais que trafegaram no período analisado, contudo o site do DER/SP fornece os valores totais de veículos, não especificando a porcentagem de cada tipo no valor total. Portanto foram adotados os veículos comerciais pesados das classes 2C(16), 2C(22), 3C(20), 3C(22), 2S2, 3S3, Ôn.(2C) e Ôn.(3C). As classes 2C possui porcentagem de aparição igual a 70%, sendo a 2C(16) com 25% e a 2C(22) com 45%. As classe 3C possui 22%, sendo 3C(20) referente a 8% e a 3C(22) referente a 14%. A classe 2S2 possui 5% de frequência, e a classe 3S3 possui 0,5%. As classes referentes aos ônibus Ôn.(2C) e Ôn.(3C) apresentam as porcentagem de ocorrência iguais a 1,0% e 1,5% respectivamente. Esses dados são inseridos na tabela de cálculo do número “N” de equivalentes, essa tabela é fornecida pelo DER/SP e utiliza o método USACE para a determinação dos dados. A porcentagem de veículos na faixa de projeto foi considerada igual a 50% e a taxa de crescimento padrão para a rodovia em questão será de 2% ao longo dos anos, e o fator climático regional foi considerado igual a 1,0 seguindo as recomendações do DER/SP. Por fim, o período de projeto será referente a 10 anos de uso.

A Quadro 4 abaixo apresenta os dados do tráfego da rodovia calculada através do método USACE utilizando as tabelas fornecidas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo.

Quadro 4 – Determinação do número N

Ano	VDM - Comerciais												FV frota		Vti	N anual	N acumulado	
	Com. 1	Com. 2	Com. 3	Com. 4	Com. 5	Com. 6	Com. 7	Com. 8	Com. 9	Com. 10	Ônibus 2C	Ônibus 3C	Total	USACE		AASHTO	USACE	USACE
	VDM-c1	VDM-c2	VDM-c3	VDM-c4	VDM-c5	VDM-c6	VDM-c7	VDM-c8	VDM-c9	VDM-c10	VDM-o2	VDM-o3	VDM-cr	flex		flex	flex	flex
1	2313	4164	740	1295	0	463	0	46	0	0	93	139	9253	2,76	1,30	1,69E+06	4,66E+06	4,66E+06
2	2359	4247	755	1321	0	472	0	47	0	0	95	142	9438	2,76	1,30	1,72E+06	4,76E+06	9,42E+06
3	2406	4332	770	1347	0	482	0	48	0	0	97	145	9627	2,76	1,30	1,76E+06	4,85E+06	1,43E+07
4	2455	4419	785	1374	0	491	0	49	0	0	99	148	9819	2,76	1,30	1,79E+06	4,95E+06	1,92E+07
5	2504	4507	801	1402	0	501	0	50	0	0	101	150	10016	2,76	1,30	1,83E+06	5,05E+06	2,43E+07
6	2554	4597	817	1430	0	511	0	51	0	0	103	153	10216	2,76	1,30	1,86E+06	5,15E+06	2,94E+07
7	2605	4689	833	1458	0	521	0	52	0	0	105	157	10420	2,76	1,30	1,90E+06	5,25E+06	3,47E+07
8	2657	4783	850	1488	0	532	0	53	0	0	107	160	10629	2,76	1,30	1,94E+06	5,36E+06	4,00E+07
9	2710	4879	867	1517	0	542	0	54	0	0	109	163	10841	2,76	1,30	1,98E+06	5,46E+06	4,55E+07
10	2764	4976	884	1548	0	553	0	55	0	0	111	166	11058	2,76	1,30	2,02E+06	5,57E+06	5,10E+07
11	2820	5076	902	1579	0	564	0	56	0	0	113	169	11279	2,76	1,30	2,06E+06	5,68E+06	5,67E+07
12	2876	5177	920	1610	0	576	0	57	0	0	116	173	11505	2,76	1,30	2,10E+06	5,80E+06	6,25E+07
13	2933	5281	938	1642	0	587	0	58	0	0	118	176	11735	2,76	1,30	2,14E+06	5,91E+06	6,84E+07
14	2992	5387	957	1675	0	599	0	60	0	0	120	180	11970	2,76	1,30	2,18E+06	6,03E+06	7,45E+07
15	3052	5494	976	1709	0	611	0	61	0	0	123	183	12209	2,76	1,30	2,23E+06	6,15E+06	8,06E+07
16	3113	5604	996	1743	0	623	0	62	0	0	125	187	12453	2,76	1,30	2,27E+06	6,27E+06	8,69E+07
17	3175	5716	1016	1778	0	636	0	63	0	0	128	191	12702	2,76	1,30	2,32E+06	6,40E+06	9,33E+07
18	3239	5831	1036	1813	0	648	0	64	0	0	130	195	12956	2,76	1,30	2,36E+06	6,53E+06	9,98E+07
19	3304	5947	1057	1850	0	661	0	66	0	0	133	199	13216	2,76	1,30	2,41E+06	6,66E+06	1,06E+08
20	3370	6066	1078	1887	0	675	0	67	0	0	135	202	13480	2,76	1,30	2,46E+06	6,79E+06	1,13E+08

Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.5.2.3 Parâmetros adicionais para a verificação mecanicista

Para a realização da verificação mecanicista ao longo do dimensionamento da estrutura, é necessário conhecer as propriedades dos materiais constituintes das camadas do pavimento proposto. É necessário também conhecer os modelos de fadiga para estes materiais.

Os Quadros 5 e 6 demonstrados abaixo, apresentam os intervalos de valores recomendados para as propriedades dos materiais de pavimentação. As variedades de tipos de materiais e suas propriedades foram determinadas pelo padrão fornecido pelo banco de dados do próprio Software Medina, que será utilizado na verificação mecanicista. Os valores fornecidos pelo programa devem estar próximos dos intervalos recomendados pelo DER/SP, para que seja utilizado na verificação.

Quadro 5 – Valores usuais de coeficiente de Poisson

<b>Material</b>	<b>Intervalo de Valores de Coeficiente de Poisson</b>	<b>Valor Recomendado de Coeficiente de Poisson</b>
Concreto de cimento <i>Portland</i>	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: Instrução de Projeto DER-SP (2006).

Quadro 6 – Valores usuais de Módulo de Resiliência

<b>Material</b>	<b>Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)</b>
Concretos Asfálticos:	
- revestimento (CAP 50-70)	2000 – 5000
- revestimento (CAP 30-45)	2500 – 4500
- <i>binder</i> (CAP 50-70)	2000 – 3000
- <i>binder</i> (CAP 30-45)	2500 – 4000
Materiais granulares	
- brita graduada	150 – 300
- macadame hidráulico	250 – 450
Materiais estabilizados quimicamente	
- solo-cimento	5000 – 10000
- brita graduada tratada com cimento	7000 – 18000
- concreto compactado com rolo	7000 – 22000
Concreto de cimento <i>Portland</i>	30000 – 35000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
- solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100 – 200
- solos de comportamento não laterítico	25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400
Concreto de cimento <i>Portland</i>	28000 – 45000

Fonte: Instrução de Projeto DER-SP (2006).

Esse procedimento não é recomendável, pois em um projeto real é necessário realizar os ensaios para a obtenção das propriedades de cada material utilizado na construção dos pavimentos. Contudo, este trabalho consiste na análise de um trecho hipotético, portanto a utilização dos dados padrões fornecidos pelo Software possibilitam o desenvolvimento do

projeto e não interferem de forma significativa no objetivo final do trabalho. Visto que o objetivo do estudo é comparar os impactos ambientais da utilização dos materiais virgens e do material fresado no modelo de estrutura prevista, portanto é um estudo apenas comparativo e não será analisado os valores absolutos ao final do desenvolvimento.

### **3.5.3 Dimensionamento estrutural de pavimento**

Os métodos empírico-mecanicistas segundo Lopes (2009), recebem essa denominação pois consistem na integração de modelos de comportamentos do pavimento e dos materiais. Nessa metodologia vários tipos de parâmetros necessitam ser utilizados para caracterizar o desempenho da estrutura sob tensão-deformação. Apesar da precisão dos modelos estabelecidos, alguns fatores devem ser analisados através da observação do projetista para determinar as situações mais adequadas àquela específica circunstância. Para o desenvolvimento da análise empírica-mecanicista é necessário portanto, propor modelos e estabelecer os métodos de dimensionamentos que deverão ser ensaiados e avaliados.

O primeiro passo consiste na concepção da estrutura, determinando o tipo de pavimento a ser avaliado, seguido das definições dos parâmetros de projeto. Nessa etapa são caracterizados a camada do subleito, o tráfego ao longo da vida útil do projeto e por fim os parâmetros adicionais para a realização da verificação mecanicista. Com esses dados em mãos, o próximo passo consiste na realização do pré-dimensionamento da estrutura através do método estabelecido.

Os ensaios para a caracterização dos materiais utilizados no pavimento devem ser adotados utilizando modelos de ensaios regidos pela norma de cada ensaio como foi citado na metodologia deste trabalho. Os valores característicos do tráfego e do tempo de vida útil do projeto devem ser baseados em dados reais obtidos nos bancos de dados de projetos rodoviários anteriores.

Com os resultados dos ensaios, são realizados os cálculos para a determinação do dimensionamento da estrutura. Essa primeira etapa, consiste no pré-dimensionamento da estrutura do pavimento. Após a obtenção do pavimento tipo, devemos analisa-lo mecanisticamente através da utilização de softwares capazes de determinar a eficiência do modelo proposto. Essa metodologia fornece um pavimento adequado para as solicitações ao longo de toda a vida útil da estrutura.

### 3.5.3.1 Método Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo – DER/SP

Para a realização do dimensionamento de pavimentos semirrígidos, que se encontram na etapa de estudo preliminar, o DER/SP recomenda a realização do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DER/SP. Esse método tem como base o método de dimensionamento do DNER de 1966 com algumas alterações.

As espessuras mínimas de revestimento asfáltico, apresentadas na Quadro 7, são fornecidas pelo DER/SP. Essa tabela é diferente da tabela fornecida pelo método do DNER, e foi alterada em função das experiências adquiridas pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. Se o a capacidade de suporte da sub-base, o ISC for igual ou superior a 40% e o número “N” de equivalente for igual ou maior que  $5 \times 10^7$ , deve-se substituir, na inequação (4) apresentada abaixo, o valor de  $H_{20}$  por  $1,2 \times H_{20}$ . Por último, o coeficiente estrutural da sub-base ou do reforço do subleito deve ser igual a 1,0, quando a capacidade de suporte, o ISC desse material for igual ou superior a três vezes a capacidade de suporte do subleito. Para a determinação dos coeficientes eu possuem relações inferiores ao apresentado, o DER/SP fornece a expressão (2) abaixo para a determinação do novo coeficiente:

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{ISC_1}{3 \times ISC_2}} \quad (2)$$

Onde:

$K_{ref}$  : coeficiente estrutural do reforço ou do subleito;

$ISC_1$  : capacidade de suporte do reforço do subleito ou da sub-base(%);

$ISC_2$  : capacidade de suporte do subleito(%);

Se o valor de  $ISC_1$  for superior a 20%, a norma recomenda que para o cálculo da relação entre  $ISC_1 / ISC_2$  seja adotado o valor igual a 20%.

Após as explicações das reformulações necessárias para o pré-dimensionamento, será realizado o método do DNER de 1966. O primeiro dado é o índice de suporte California (CBR), obtido através dos ensaios regidos pela norma DNER-ME 049/94. A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes é determinada pelo seu valor de CBR. Para o pavimento proposto, o valor de CBR é igual ou superior a 8%.

O segundo dado importante para a análise é o número equivalente (N) medido pelo volume médio diário de tráfego ao longo de toda vida útil do projeto. Esse dado é fornecido pelo Quadro 4, calculada através do método USACE. O valor N na tabela é igual a  $5,0 \times 10^7$ .

O fator climático regional, que leva em conta as variações de umidade durante todas as estações no ano. Esse dado terá seu valor adotado igual a 1,0, não alterando assim a determinação final da estrutura do pavimento. Essa adoção tem base nas pesquisas desenvolvidas no IPR/DNER, como citado no manual de pavimentação do DNIT 2006.

Com todos esses dados fixados, é plotado um ponto no ábaco de determinação de espessuras do pavimento, mostrado na figura 16. A espessura total do pavimento em centímetros, pela análise empírica tem um valor aproximado de 56 cm. A distribuição das camadas é estabelecida através da resolução das sucessivas inequações apresentadas abaixo:

$$H_t = 77,67 \times N^{(0,0482)} \times CBR^{(-0,598)} \quad (3)$$

$$R \times K_r + B \times K_b \geq H_{20} \quad (4)$$

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \geq H_n \quad (5)$$

$$R \times K_r + B \times K_b + h_{20} \times K_s + h_n \times K_{ref} \geq H_m \quad (6)$$

O coeficiente R representa a espessura do revestimento. Ele é obtido pelo Quadro 7 fornecido abaixo, que relaciona o número equivalente N com a espessura mínima de revestimento que a estrutura do pavimento pode ter.

Quadro 7 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

<b>Tipo e Espessura do Revestimento Asfáltico</b>	<b>Número "N"</b>
Tratamentos superficiais asfálticos duplos e triplos	$N \leq 1 \times 10^6$
Concreto asfáltico com 5,0 cm de espessura	$1 \times 10^6 < N \leq 5 \times 10^6$
Concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura	$5 \times 10^6 < N \leq 1 \times 10^7$
Concreto asfáltico com 10,0 cm de espessura	$1 \times 10^7 < N \leq 2,5 \times 10^7$
Concreto asfáltico com 12,5 cm de espessura	$2,5 \times 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$
Concreto asfáltico com 15,0 cm de espessura	$N > 5 \times 10^7$

Fonte: Projeto de Pavimentação DER/SP (2006).

Os Coeficientes  $K_r$ ,  $K_b$ ,  $K_s$  e  $K_{ref}$  das inequações (4), (5) e (6) são obtidos pelo Quadro 8 abaixo. Esses coeficientes representam valores de equivalência estrutural entre os diferentes

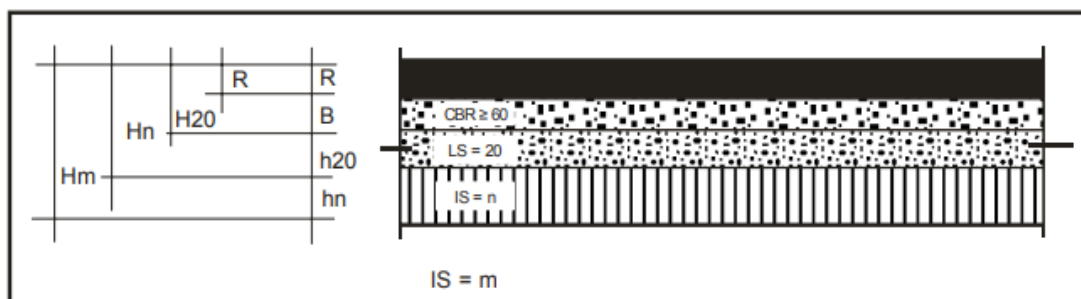
materiais. Os coeficientes  $K_r$ ,  $K_b$ ,  $K_s$  e  $K_{ref}$  representam as equivalências estruturais do revestimento, base, sub-base e da camada de reforço respectivamente.

Quadro 8 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
<b>Camadas granulares</b>	
<b>1,00</b>	
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006).

Figura 28 – Dimensionamento do pavimento



Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006).

Com o auxílio das inequações do método utilizado pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006), e pelos dados obtidos através dos ensaios mostrados anteriormente, foi calculada as espessuras de todas as camadas do pavimento. A figura 28 representa as variáveis para cada camada do pavimento, auxiliando assim o dimensionamento do pavimento.

Como podemos observar no Quadro 9 abaixo, cada camada possui o seu coeficiente K característico e o seu valor de CBR mínimo. As espessuras das camadas foram calculadas e adicionadas no Quadro 9, os valores das camadas de sub-base e reforço do subleito foram

estabelecidos através das espessuras mínimas determinadas pelo método do DNER, visto que seus valores nas inequações foram menores que o mínimo estabelecido pela norma.

Quadro 9 – Descrição das camadas

Camada	Descrição do Material	Tipo	Espessura (cm)	k	CBR (%)	Coefficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade
Revestimento	Concreto Asfáltico	Classe 4	12,5	2,00	-	0,30	5000
Base	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C5	11,5	1,00	≥ 80%	0,35	300
Sub-base	Brita Graduada Trata com Cimento (BGTC)	BGTC 3%	15	1,70	-	0,20	18000
Reforço do Subleito	Solo Fino, Siltoso ou Argiloso	Solo Argiloso LG'	15	0,85	≥ 15%	0,40	200
Subleito	Subleito	Solo Fino NA	Semi-infinita	-	≥ 8%	0,40	75

Fonte: Produção do próprio autor.

Com relação ao dimensionamento das estruturas da parte do acostamento, o manual do DNIT orienta que não há dados seguros para o seu dimensionamento. Portanto a sua espessura está condicionada aos valores obtidos da faixa de trânsito. Podem ser realizadas reduções de espessura apenas na camada de revestimento.

### 3.5.4 Verificação mecanicista

O programa utilizado para a realização da verificação mecanicista foi o Medina, que foi elaborado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, juntamente com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES e de diversas Universidades do Brasil. Esse software realiza a verificação e o dimensionamento por meio da rotina chamada de AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas. Essa rotina é baseada na teoria da elasticidade.

O programa possui uma interface dividida em abas que permite ao usuário a identificação de todas as características do pavimento, bem como a consulta dos resultados realizados e do dimensionamento. A tela inicial é apresentada na figura 29, que permite entrar com todos os dados essenciais do projeto. Essa tela é formada por quatro elementos, a área para identificação do projeto, uma tabela referente à entrada de dados da estrutura do pavimento, uma tabela referente à entrada de dados sobre o tráfego e um painel onde o programa registra o resultado das análises.

Figura 29 – Tela inicial software Medina

MeDiNa - v.1.1.3.0 - set/2019

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: MarcusVMAlencar EMPRESA: Unesp

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODDO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Entre com os dados c

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Produção do próprio autor.

Para a realização da análise é necessário realizar quatro etapas. A primeira consiste em definir qual modo o programa irá tratar os dados. O software possui dois modos, o primeiro modo é “Pavimento Novo” e o segundo modo é “Projeto de Reforço”. O modo de “Pavimento Novo” elabora um projeto de pavimento onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios laboratoriais. O projeto analisado nesse trabalho foi feito através do modo “Pavimento Novo”.

A segunda etapa do projeto é o preenchimento das informações de identificação, sendo necessário preencher os campos “Responsável”, “Projeto” e “Empresa”. Essa etapa permite a fácil identificação do trecho e do projeto.

A terceira etapa consiste na definição da estrutura do pavimento. O programa inicializa com uma estrutura padrão, apenas para servir como exemplo para o usuário, essa estrutura é apresentada na figura 29. Essa estrutura inicial pode ser totalmente alterada podendo apresentar no mínimo três camadas e no máximo oito camadas. Na tabela que exibe as estruturas, são apresentadas as informações referentes as propriedades físicas de cada camada da estrutura. Ao selecionar o tipo de material da camada, o programa permite a entrada de dados dos ensaios realizados pelo usuário. As informações apresentadas de cada camada são a

descrição do material, o tipo selecionado, a espessura, o módulo de resiliência (se sigmoideal ou linear), e o seu coeficiente de Poisson.

Por fim é definido as informações do tráfego. O programa Medina opera sob o conceito do Número Equivalente. Os dados de entrada dessa etapa foram obtidos através dos relatórios fornecidos pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo. O software Medina realiza o cálculo do Número Equivalente utilizando o método USACE.

Após a realização de todas as etapas, o programa realiza a verificação mecanicista, analisando os critérios de área trincada e as deformações permanentes com relação as espessuras informadas. No final é apresentado um relatório avaliando o comportamento da estrutura. Essa função permite determinar a eficiência dos materiais, assim como uma melhor assimilação de como as estruturas estão trabalhando ao longo do perfil estrutural.

O resultado fornecido pelo software está descrito abaixo:

Análise do Pavimento:

- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa Medina.
- Nível de confiabilidade da análise: 85%
- Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 82,5%
- Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.
- Afundamento de Trilha de Roda: 4,6mm

Alertas:

- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

É necessário portanto, remodelar toda a estrutura do pavimento para que o tráfego seja atendido, garantindo que as medidas limites sejam obedecidas.

### **3.5.5 Adequação**

Para adequar uma nova estrutura, foram observadas as camadas que tiveram maior deformação. As camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito necessitaram de correção para diminuir a porcentagem da área trincada ao longo da vida útil. Após feita essa análise, uma nova estrutura foi proposta, como demonstrada no Quadro 10 abaixo.

Quadro 10 – Descrição da nova estrutura

Camada	Descrição do Material	Tipo	Espessura (cm)	Módulo (Mpa)	CBR (%)	Coefficiente de Poisson
1	Concreto Asfáltico	Classe 4	15	10.492	-	0,3
2	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C5	12	381	>80%	0,35
3	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	BGTC 3%-RAP 63%	22	Sigmoidal	-	0,2
4	Solo Fino, Siltoso ou Argiloso	Solo Argiloso LG' (1)	25	250	>15%	0,45
SL	Subleito	Solo Fino NA	0	Resiliente Não Linear	>8%	0,45

Fonte: Produção do próprio autor.

A nova estrutura foi testada dentro do software e obteve valores aceitáveis para a sua execução, como demonstrado pela resposta fornecida.

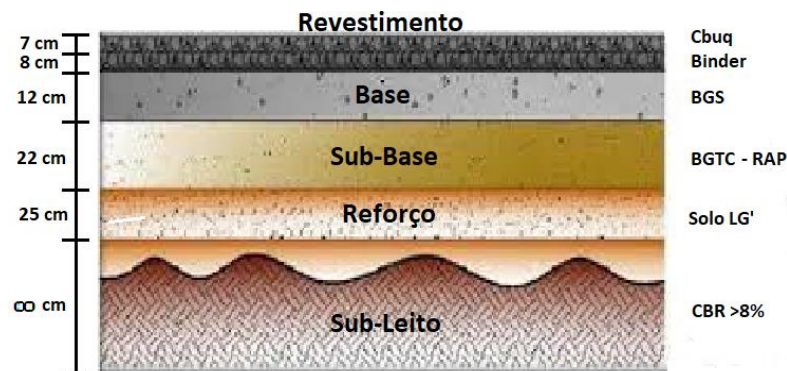
Análise do Pavimento:

- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa Medina.
- Nível de confiabilidade da análise: 85%
- Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 48,1%
- Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.
- Afundamento de Trilha de Roda: 2,4mm

### 3.5.6 Modelo final

Para o desenvolvimento do projeto, o modelo proposto abaixo atende a todas as necessidades.

Figura 30 – Modelo final



Fonte: Adaptado de Marques (2007).

### 3.6 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Para a realização da ACV aplicada a infraestrutura de pavimentos, é necessário caracterizar o projeto que será desenvolvido. Portanto, o projeto que será investigado consiste em um caso genérico capaz de estabelecer uma relação entre um pavimento semirrígido construído com dois tipos de materiais. O primeiro caso terá a utilização de materiais virgens e o segundo será utilizado materiais reciclados na estrutura do pavimento.

Os critérios apresentados para a estruturação da ACV foram definidos pela ISO 14040 e a ISO 14044. Essas definições cruciais requeridas para o escopo da ACV, tiveram seus dados obtidos através dos ensaios e da utilização de dados reais fornecidos pelos relatórios do DNIT.

#### 3.6.1 Escopo

##### - Função do sistema

A função do sistema é caracterizada pela construção da estrutura asfáltica semirrígida, por um período de 10 anos, garantindo segurança e conforto aos usuários ao longo de todo o período sem a necessidade de manutenção ao longo desse intervalo.

##### - Unidade funcional

A unidade funcional é referente a construção de dez quilômetros de pavimento asfáltico de qualidade, com quatro faixas de tráfego com largura de 3,6 m cada, somando ao todo 14,4 m de largura. Para a unidade funcional não será contabilizado os dados dos trechos das faixas de segurança e dos acostamentos, pois eles podem apresentar valores distintos para a sua

construção. As faixas de tráfego pesado estarão sujeitas ao tráfego de  $5 \times 10^7$  (calculado pelo método USACE).

#### - Sistema

A análise de ciclo de vida desenvolvida ao longo desse trabalho não se trata de uma análise completa. Todo o processo de construção da estrutura foi dividido em cinco etapas sendo elas, a produção dos materiais, serviços, produção, transporte e equipamentos.

#### - Fronteiras do sistema de produto

As fronteiras são definidas através de uma análise do percentual de massa de cada material utilizado nos processos. Essa análise deve ser realizada afim de cortar os serviços e materiais que de fato possuem relevância para os cálculos da ACV. Através desse procedimento, para o trabalho que será desenvolvido, todo e qualquer insumo que apresentou uma quantidade inferior ou igual a 0,5 do valor total em peso de todos os insumos foi desconsiderado nos cálculos.

#### - Requisitos dos dados

Para o desenvolvimento dessa ACV, os dados referentes ao inventário de ciclo de vida (ICV) foram obtidos através dos cálculos dos volumes e massas dos materiais presentes na estrutura, e pelos dados coletados através do software PavementLCA.

#### - Categorias de impactos ambientais selecionadas e método para AICV

As categorias de impacto expostas foram: energia primaria total, energia primaria não renovável, consumo de combustíveis fosseis, potencial de acidificação, potencial de aquecimento global, toxicidade humana do ar, potencial de poluição do ar, potencial de eutrofização. Essas categorias são fornecidas pelo software, que possibilita caracterizar de forma coerente os impactos ambientais dos pavimentos em estudo. O critério de depleção da camada de ozônio não foi contabilizado, pois ao longo do estudo foi possível observar que não ocorre alteração significativa dessa variável ao longo da ACV.

#### - Pressupostos

Esse estudo analisa a diferença dos efeitos causados no meio ambiente por dois pavimentos distintos. Apesar dos pavimentos serem distintos, existem algumas semelhanças ao longo das estruturas e da locação que permitem a simplificação das fases a serem analisadas. São considerados as fases de produção dos materiais e a fase da concepção da estrutura, tendo em vista que as etapas de transporte de materiais, alocação da obra e o transporte de descarte são iguais para os dois pavimentos.

#### - Hipóteses simplificadoras

O estudo realizado não representa um caso real. Apesar de ser um estudo de um pavimento fictício, os dados que são expostos e a metodologia aplicada são aceitos pela norma ISO 14040 e a ISO 14044.

Dados reais auxiliaram na definição do projeto. Como já foi mostrado os dados referentes aos cálculos de tráfego e da estrutura foram feitos através de valores obtidos pelos relatórios do DNIT de uma rodovia localizada no estado de São Paulo.

Ensaio laboratoriais auxiliaram na caracterização dos materiais. O material utilizado na concepção do pavimento foi ensaiado e avaliado tecnicamente antes de ser aplicado na análise do ciclo de vida, portanto os valores são coerentes com o objetivo do projeto.

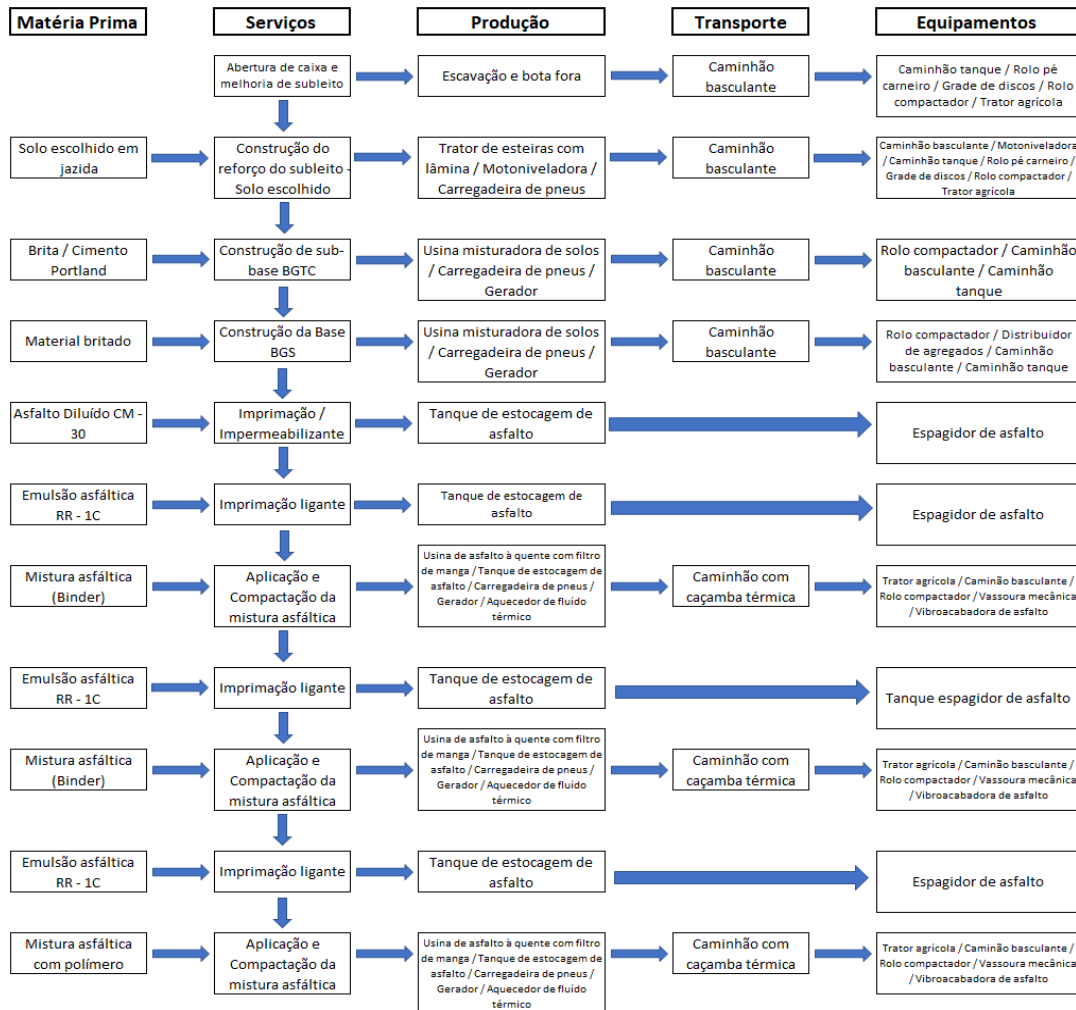
As fases do ciclo de vida. Por envolver uma análise comparativa, a principal característica que será analisada ao longo da ACV será a parte das operações de extração e beneficiamento de matéria prima, que está relacionada a produção dos materiais. A segunda parte importante é a aplicação do material e a construção do pavimento. A fase de transporte dos materiais foi minimizada, devido a igualdade das distancias entre os locais de armazenamento e da obra para os dois casos analisados. Mesmo existindo essa igualdade, haverá uma diferença de consumo e gasto para cada pavimento relacionada ao transporte, pois existe a necessidade maior e menor de um determinado tipo de material ou mesmo de uma determinada máquina ou equipamento ao longo da obra, o que altera os valores de alguma forma.

Diferentes fontes de dados apresentam diferentes resultados para o mesmo tipo de Análise. É necessário buscar um banco de dados que oferece informações aplicáveis a realidade em que a obra está sendo analisada.

### 3.6.2 Inventário do Ciclo de Vida

Com a determinação do escopo e do objetivo do projeto, foi realizado o levantamento do inventário, tendo como base o fluxograma apresentado na figura 31 abaixo.

Figura 31 – Fluxograma do ciclo de vida



Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxograma apresentado foi feito através de uma análise de uma obra de um pavimento asfáltico semirrígido realizado no Brasil. Podemos observar que os materiais e os equipamentos apresentados condizem com a realidade brasileira, contudo para o software PavimentLCA os equipamentos e os métodos construtivos são baseados na realidade norte-americana. Os dados obtidos são oriundos do banco de dados do instituto Athena e do SimaPro.

Apesar dessa divergência, foi realizada a ACV. O fluxograma serviu como base para o desenvolvimento do inventário. No software PavementLCA, podemos apenas selecionar as matérias primas que serão utilizadas e a configuração da estrutura do pavimento. São requeridos também os dados de tráfego durante o uso do pavimento, a vida útil do projeto, a localização da obra e as distancias entre a obra e os locais de armazenamento de equipamentos, materiais e da garagem. Após a entrada desses dados os equipamentos de construção são fornecidos pelo próprio banco de dados, assim como as quantidades e o tempo necessário para a realização e finalização da obra.

No Quadro 11 abaixo mostra os equipamentos necessários para a realização do pavimento semirrígido com RAP na camada de sub-base.

Quadro 11 – Equipamentos utilizados

<b>Equipamento</b>	
Compressor de ar	Escavadora >50, <100 Hp
Pavimentadora de asfalto	Caminhão basculante
Misturador de asfalto	Máquina de Aquecimento
Espargidor de Asfalto	Caminhão de Pintura
Britadeira	Cortadora
Reciclador a frio	Serra para acostamento
Compactador	Rolo
Serra de concreto	Pistola de Areia
Caminhão misturador	Equipamento selante
Moedor de diamante	Caminhão tanque
Escavadora <120 Hp	Caminhão a vácuo
Escavadora >250 Hp	Compressor de água
Escavadora <50 Hp	Caminhão de água
Escavadora >250 Hp	Veículo HMA

Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 12 abaixo mostra a quantidade de material necessário por serviço e para a realização do pavimento semirrígido com materiais virgens em todas as camadas.

Quadro 12 – Quantidade de serviços para construção inicial

<b>Serviço</b>	<b>Und</b>	<b>Qtd Pav virgem</b>	<b>Qtd Pav com Rap</b>
"Binder" tipo CBUQ-faixa B	t	27.648	27.648
Pintura de ligação	m <sup>2</sup>	288.000	288.000
Imprimação	m <sup>2</sup>	144.000	144.000
CBUQ com polímero	t	24.192	24.192
Base de BGS	m <sup>3</sup>	17.280	17.280
Base de BGTC	m <sup>3</sup>	31.680	19.958,4
Reforço do subleito	m <sup>3</sup>	36.000	36.000
Rap	m <sup>3</sup>	-	11.721,6

Fonte: Produção do próprio autor.

Os dados apresentados informam as necessidades de uma obra, ou seja, os valores mostrados representam um modelo ideal de uma pavimentação. Em um caso real, as quantidades e de máquinas e de serviços podem variar devido aos desperdícios e problemas vinculados a uma obra. Para evitar uma contaminação dos dados, o consumo de materiais e serviços extras não foram contabilizados.

Outro ponto importante a se destacar, está na falta de acesso à descrição dos materiais e dos cálculos dos valores finais, o que pode trazer algumas alterações de valores. No Software LCAPavement devemos usar materiais similares aos utilizados no Brasil, e que possuem ciclos de vida diferentes. Esse estudo de caso foi desenhado com o objetivo de analisar comparativamente os impactos ambientais de diferentes materiais construtivos, portanto o uso da ACV com essas informações ainda sim se torna viável para a análise desejada.

É recomendado a utilização de mais de um software, que utilizam bancos de dados globais ou bancos de dados que se aproximam ao máximo da realidade do local da obra.

### 3.6.3 Análise de Impacto

A terceira etapa do processo de ACV, consiste na análise dos impactos gerados pelos dados fornecidos pelo inventário do ciclo de vida. Serão apresentados os impactos que demonstraram a maior intensidade de ocorrência. Primeiramente, foram analisados os dados gerados individualmente por pavimento, para que depois fossem verificadas as diferenças de impactos comparativamente entre eles. Portanto, ao fim da análise foi calculada a diferença percentual dos impactos de cada pavimento em cada categoria, para que assim possa ser feita a análise de ganho ambiental.

### 3.6.4 Resultados e Discussões

Nos Quadros 13, 14 e 15 são apresentados os resultados obtidos através dos cálculos realizados no software PavementLCA. As tabelas e os gráficos mostram de forma didática a diferença entre os impactos ambientais causados pelos dois tipos de pavimentos analisados. Podemos observar os ganhos ambientais relacionados a cada projeto, além de observar que a maior parte dos impactos ambientais de uma obra está na relação entre a fabricação dos materiais e na construção da obra.

No Quadro 13, são apresentados os resultados obtidos das análises dos impactos de potencial de acidificação, das partículas HH referentes a toxicidade humana do ar, e o potencial de eutrofização. Estão representadas também as unidades de medida para cada impacto e a quantidade referente a cada etapa dos processos. Isso permite uma análise mais precisa dos processos que impactam o meio ambiente. Na figura 32, é demonstrado graficamente os valores totais de cada impacto.

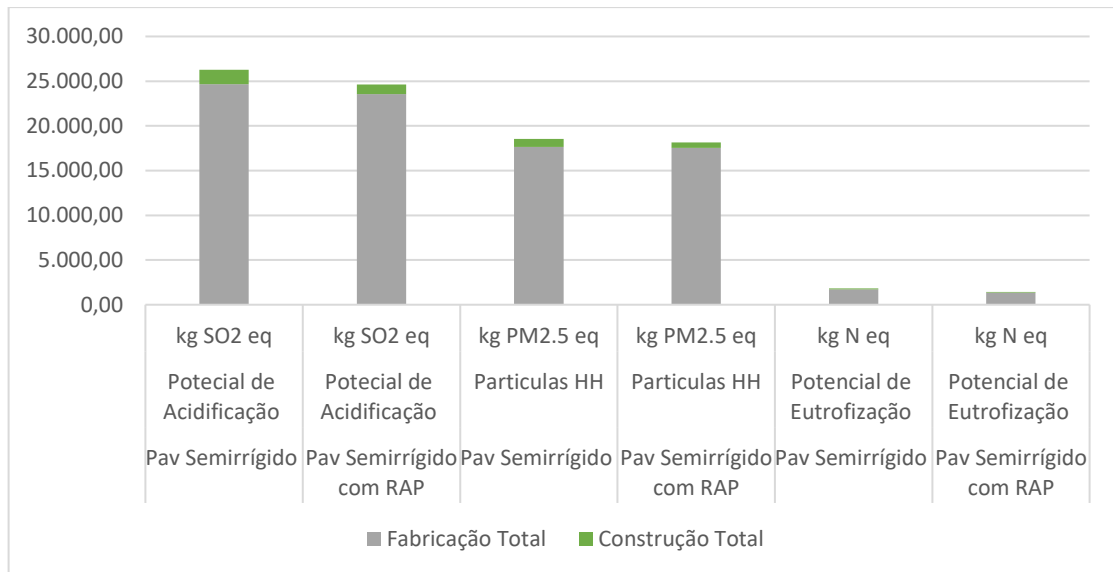
Quadro 13 – Dados dos impactos ambientais potencial de acidificação, partículas HH e potencial de eutrofização

Nome do Projeto	Impacto	Und	Fabricação			Construção		
			Mat	Transp.	Total	Eq	Transp.	Total
Pav Semirrígido	Potencial de Acidificação	kg SO2 eq	22.870,80	1.782,73	24.653,54	240,42	1.388,64	1.629,05
Pav com RAP	Potencial de Acidificação	kg SO2 eq	22.173,34	1.363,30	23.536,64	149,16	943,30	1.092,46
Pav Semirrígido	Partículas HH	kg PM2.5 eq	16.743,71	888,93	17.632,64	132,94	768,74	901,68
Pav RAP	Partículas HH	kg PM2.5 eq	16.858,35	669,86	17.528,21	83,03	522,61	605,63
Pav Semirrígido	Potencial de Eutrofização	kg N eq	1.605,98	110,91	1.716,90	14,11	86,49	100,60
Pav com RAP	Potencial de Eutrofização	kg N eq	1.281,79	84,10	1.365,89	9,11	58,34	67,45

Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 31 é possível observar que existe um ganho ambiental para todas as categorias analisadas quando comparamos os dois métodos construtivos. Outro fator interessante a ser observado, está no fato da grande influência da etapa de fabricação nos impactos analisados.

Figura 32 – Resultados potencial de acidificação, partículas HH e eutrofização



Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 14, são demonstrados os valores referentes aos efeitos do aquecimento global e os impactos do efeito estufa das estruturas. Os valores obtidos estão calculados em toneladas de CO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> respectivamente. Assim como os impactos anteriores, observamos um ganho ambiental nas duas categorias analisadas, também é possível observar que a etapa de fabricação continua sendo a etapa com os maiores valores de emissão de gases.

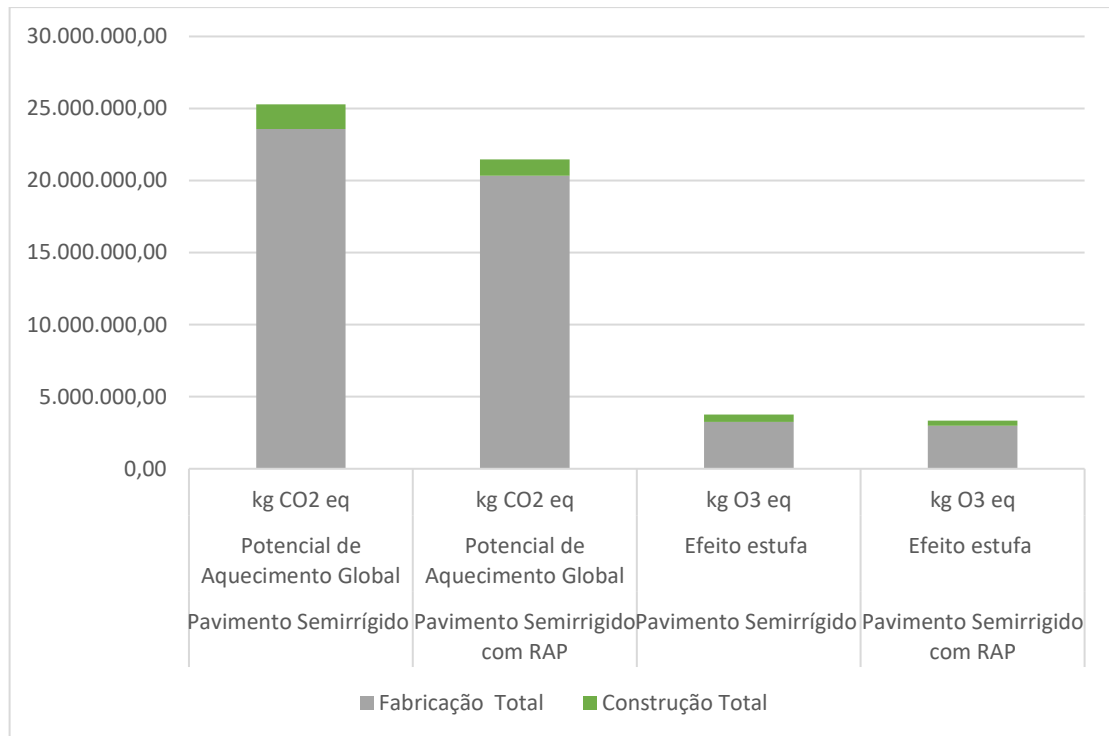
Quadro 14 - Dados dos impactos ambientais potencial de aquecimento global e efeito estufa

Nome do Projeto	Impacto	Und	Fabricação			Construção		
			Mat	Transp	Total	Eq	Transp	Total
Pav Semirrígido	Potencial de Aquecimento Global	t CO2 eq	21.877,12	1.707,52	23.584,65	251,35	1.443,00	1.694,35
Pav com RAP	Potencial de Aquecimento Global	t CO2 eq	19.039,52	1.291,61	20.331,13	157,66	980,97	1.138,63
Pav Semirrígido	Efeito estufa	t O3 eq	2.689,73	567,07	3.256,81	75,66	437,90	513,56
Pav com RAP	Efeito estufa	t O3 eq	2.561,96	434,43	2.996,39	47,23	297,69	344,92

Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 33 é referente ao gráfico dos valores obtidos pela tabela 9, mostrando comparativamente os valores entre cada pavimento e suas etapas.

Figura 33 - Resultados potencial de aquecimento global e efeito estufa



Fonte: Produção do próprio autor.

No Quadro 15 são apresentados os valores referentes a energia primaria total, a energia não renovável e aos combustíveis fósseis. Os valores são fornecidos em Gigajoule, para todos os impactos. Podemos observar que os valores obtidos continuam apresentando um comportamento padrão, onde a estrutura que possui material fresado apresenta um ganho ambiental comparada ao pavimento que utiliza materiais virgens. Assim como os valores de fabricação são responsáveis pela maior quantidade relativa de impactos ambientais.

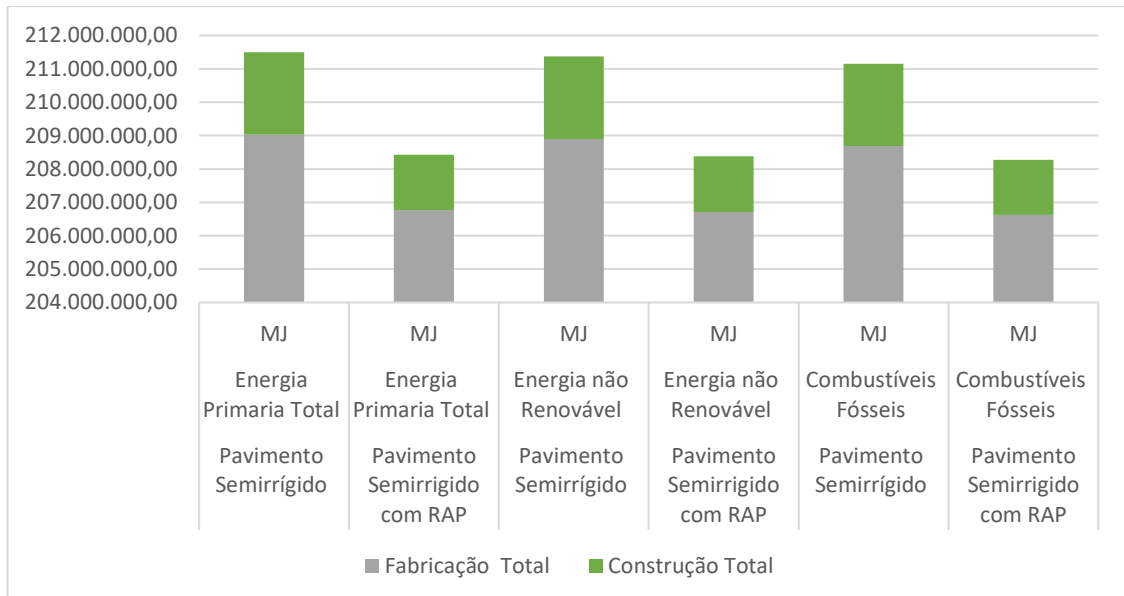
Quadro 15 - Dados dos impactos ambientais energia primaria total, energia não renovável e combustíveis fósseis

Nome do Projeto	Impacto	Und	Fabricação			Construção		
			Mat	Transp	Total	Eq	Transp	Total
Pav Semirrígido	Energia Primaria Total	GJ	206.562,1	2.466,0	209.028,1	366,57	2.104,24	2.470,8
Pav com RAP	Energia Primaria Total	GJ	204.905,5	1.861,9	206.767,4	229,94	1.430,50	1.660,4
Pav Semirrígido	Energia não Renovável	GJ	206.433,2	2.465,0	208.898,2	366,41	2.103,35	2.469,7
Pav com RAP	Energia não Renovável	GJ	204.854,1	1.861,1	206.715,2	229,84	1.429,89	1.659,7
Pav Semirrígido	Combustíveis Fósseis	GJ	206.228,4	2.461,1	208.689,5	365,84	2.100,07	2.465,9
Pav com RAP	Combustíveis Fósseis	GJ	204.763,3	1.858,2	206.621,6	229,48	1.427,66	1.657,1

Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 34 apresenta os gráficos dos valores da tabela 10, comparando as energias das etapas dos pavimentos.

Figura 34 - Resultados energia primaria total, energia não renovável e combustível fóssil



Fonte: Produção do próprio autor.

Para verificar de forma quantitativa os ganhos referentes a cada estrutura, foi apresentado no Quadro 16. Essa tabela mostra os valores totais de cada categoria de impacto

para os dois tipos de estrutura, e compara os valores estabelecendo a diferença percentual entre as estruturas.

Quadro 16 - Dados comparativos dos impactos ambientais

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Und</b>	<b>Convencional</b>	<b>RAP</b>	<b>Ganhos (%)</b>
Potencial de acidificação	kg SO2	26282,59	24629,1	6,29
Partículas HH	kg PM2.5	18534,32	18133,84	2,16
Potencial de eutrofização	kg N	1817,5	1433,34	21,14
Potencial de aquecimento global	t CO2	25279	21469,13	15,07
Efeito estufa	t O3	3770,37	3341,31	11,38
Energia primária total	GJ	211498,96	208427,9	1,45
Energia não renovável	GJ	211368,06	208375,02	1,42
Combustíveis fósseis	GJ	211155,44	208278,76	1,36

Fonte: Produção do próprio autor.

Essa tabela mostra que realmente existe um ganho ambiental para o cenário de utilização do RAP nas camadas de sub-base da estrutura. Assim como é possível analisar que todas as categorias de impacto são afetadas de forma mais significativa pela atividade de fabricação. Infelizmente não é possível compreender as considerações realizadas pelo software PavementLCA, visto que ele não permite ao usuário realizar mudanças nas suas formulações.

Apesar da pouca interação do usuário com os cálculos e os materiais e equipamentos, o software é eficiente e didático. Além de ser uma opção gratuita para a realização dos estudos de ACV. Isso possibilita integrar os impactos ambientais nas tomadas de decisões para as obras e pesquisas.

## 4 CONCLUSÃO

A técnica de análise de ciclo de vida (ACV), tem como objetivo principal analisar um sistema produtivo pelo seu caráter ambiental, gerando valores plausíveis de comparação e quantificação desses sistemas. Apesar de ser uma técnica já consolidada em algumas áreas, tal análise ainda se encontra embrionária nos estudos de infraestruturas de pavimentos no Brasil. A ACV possibilita a eliminação das subjetividades que estão vinculadas aos estudos ambientais.

O trabalho visou analisar duas estruturas asfálticas, a primeira constituída de materiais virgens e a segunda utilizando material fresado produzido pela Concessionária CCR Nova Dutra. Foram realizados dois estudos importantes para a verificação da utilização desse material em campo. A primeira etapa consistiu na análise técnica do material, verificando suas propriedades e posteriormente o dimensionando de um pavimento que utiliza desse material em sua estrutura. A segunda etapa consistiu na quantificação e comparação dos impactos ambientais gerados por essas duas estratégias distintas de pavimento asfáltico. Foram averiguados os impactos ambientais gerados das fases de fabricação dos materiais, do transporte e dos equipamentos utilizados.

A ACV foi realizada considerando os dados e métodos do software PavementLCA. A análise realizada constatou que existe uma redução em todos os impactos ambientais definidos no inventário do ciclo de vida (ICV), quando o pavimento possui a presença do material fresado em sua estrutura.

Uma verificação importante observada ao longo da ACV, está relacionada as atividades de maior impacto ambiental em uma construção de um pavimento. As atividades relacionadas a construção do pavimento possuem pegadas ambientais comparativamente bem inferiores as etapas de fabricação dos materiais. As categorias que apresentaram maior ganho ambiental quando utilizado o RAP, foram o potencial de eutrofização e o potencial de aquecimento global, apresentando uma redução de 21,14% e 15,07% respectivamente. Esses valores representam um ganho significativo perante a redução dos impactos gerados pela construção de uma obra rodoviária.

Existem diferenças importantes e significativas entre os dados coletados por bancos de dados distintos. Portanto, para a realização de um estudo coerente deve-se realizar as análises de ACV em mais de uma fonte. Nos casos de estudos voltados para a realidade brasileira, é recomendado que seja realizada as análises em softwares que utilizem dados brasileiros e dados globais em suas análises. Esse é o principal ponto referente a qualidade dos dados

obtidos pela ACV realizada por este trabalho. O software PavementLCA utiliza os dados norte-americanos e canadenses para a realização dos cálculos, o que proporciona uma possível grande distorção dos valores obtidos.

Apesar deste entrave importante do programa, a realização do trabalho só foi possível devido ao fato do programa ser gratuito, diferente dos demais programas presentes no mercado que possuem um alto valor comercial. O software é bem didático, e trabalha com dados de entrada simples, oferecendo uma facilidade de compreensão dos resultados fornecidos, apesar de ser uma ferramenta fechada para o usuário.

A ACV traz um novo ponto de vista para os processos construtivos das obras. Salienta-se que a ACV por si só não deve ser utilizada como um método de determinação construtivo, e sim um modelo a mais para ser averiguado pelos profissionais responsáveis.

Analisando o material fresado pelo caráter técnico estrutural, observamos que o material não apresenta as propriedades físicas mínimas estabelecidas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo. A resistência à compressão simples e a resistência a tração indireta obtida aos 28 dias ficaram abaixo de 4,0 Mpa e 0,7 Mpa respectivamente. Ou seja, esse material não poderia ser utilizado em uma possível obra rodoviária nas faixas de serviço.

A junção dos aspectos técnicos e ambientais nesse momento se fez relevante pois, apesar da restrição do uso desse material, conseguimos concluir que ele apresenta uma vantagem significativa quando analisado pelo aspecto ambiental. Portanto, a utilização desse material não deve ser descartada, podendo ser utilizado em outras partes da rodovia. Partes como as faixas de segurança e do acostamento da rodovia, trechos que não apresentam uma porcentagem alta de veículos passantes.

Por fim, recomenda-se que para pesquisas futuras sejam realizados contatos diretos com projetos de pavimentação reais, possibilitando a delimitação mais precisa do processo de produção completo de uma rodovia. Assim como a utilização de um maior número de fontes de dados para as análises de ACV.

## REFERÊNCIAS

- ABEDA - Associação brasileira das empresas distribuidoras de asfaltos. 2020. **O papel do distribuidor e industrializador de asfaltos**. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/mercado/>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342/11**: standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures. Washington, DC, 2011.
- ARAÚJO, Marcelo Almeida. *et. al.* **Análise comparativa de métodos de pavimentação – pavimento rígido (concreto) x flexível (asfalto)**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, ano 01, n. 11, v. 10, p. 187-196, nov. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- BALBO, José Tadeu, **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de textos, 2007. v. 1. 560 p.
- CAVA, Felipe. 2018. **Como dimensionar pavimentos flexíveis pelo método do DNER**. Disponível em: <https://alemdainercia.com/2018/01/31/como-dimensionar-pavimentos-flexiveis-pelo-metodo-do-dner/>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- CIMENTO.ORG. **Cimento no Brasil**. 2016. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-no-brasil/#:~:text=A%20ind%C3%BAstria%20de%20cimento%20brasileira,146%20kw%2Fhora%20por%20tonelada>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimento asfáltico**: comparação do método do DNER com um método mecanístico - empírico aplicada a um trecho. 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003-TER**: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos terminologia. Rio de Janeiro, 2003.
- DER - Departamento de Estradas de Rodagem. 2020. **Contagem volumétrica classificatória**. Disponível em: <http://200.144.30.103:8081/vdm/Page/Index.aspx>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- DER/SP - Departamento de estradas de rodagem do estado de São Paulo. **IP – 08/2004**: análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento. São Paulo, 2004.
- DYNATEST. **Tipos de patologia do asfalto em rodovias**. 2017. Disponível em: <http://dynatest.com.br/tipos-de-patologia-do-asfalto-em-rodovias/#:~:text=Os%20principais%20tipos%20de%20patologia,detalhes%20sobre%20cada%20um%20deles>. Acesso em: 12 nov. 2020.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecânico – empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 314 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

GERMANO, Alan. **Plano de gestão de manutenção reduz custos**. Disponível em: <https://portaldetecnologia.com.br/plano-de-gestao-de-manutencao-reduz-custos/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

GLOBO comunicação e participações. **Construção civil consome até 75% da matéria-prima do planeta**: mão de obra e novas tecnologias podem reduzir o consumo de materiais. 2014. Disponível em: <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>. Acesso em: 12 nov. 2020.

IBICT - Instituto brasileiro de informação em ciência e tecnologia. **O que é avaliação do ciclo de vida**. 2019. Disponível em: <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

IPR - Instituto de pesquisas rodoviárias. **DNIT TED nº 682/2014**: execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico – empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 2018.

JOHN, Vanderley M. *et al.* **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: Arte Interativa, 2017. 712 p. v. 2.

KAKAZU, Daniella. **Análise do ciclo de vida**: uma ferramenta para calcular impactos ambientais: autossustentável. 2015. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2015/12/analise-do-ciclo-de-vida-uma-ferramenta-para-calcular-impactos-ambientais.html>. Acesso em: 12 nov. 2020.

MOTTA, Laura M. Goretti. *et al.* **Pavimentação asfáltica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006. 338 p.

NÚÑEZ, Washington Péres.; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. **Análise comparativa das propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas quentes e mornas**. Relatório de Pesquisa RDT – CONCEPA / ANTT. Porto Alegre, 2017.

QUIUMENTO, Francisco. 2011. **Análise do ciclo de vida**. Disponível em: <https://sites.google.com/site/medioquestoesambientais/analise-do-ciclo-de-vida#TOC-Objetivos-e-finalidade-da-ACV>. Acesso em: 12 nov. 2020.

REZENDE, Elcio Nacur.; COELHO, Hebert Alves. Impactos ambientais decorrentes da construção de estradas e suas consequências na responsabilidade civil. **RVMD**, Brasília, Universidade Católica de Brasília, v. 9, n. 2, p. 155-180, jul./dez. 2015

RIBEIRO, Thiago Pinheiro. **Estudo descritivo das principais patologias em pavimento flexível**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 4. ed., ano 02, v. 01, p. 733-754, jul. 2017.

SAIC - Scientific applications international Corporation. **Life cycle assessment: principles and practice**. National servisse center for environmental publications (NSCEP), Cincinnati, 2006. Disponível em: <https://bit.ly/36oKdCY>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SAMPAIO, Philipe Ribeiro. **Utilização do revestimento em cbuq em pavimentos de vias urbanas**: estudo de defeitos no revestimento em uma rua da cidade de Aracaju. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe campus Aracaju, Aracaju, 2017.

SANTOS, Caio Rubens Gonçalves. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários**: uma abordagem probabilística. 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SAVIETTO, Júlia Panzarin. **Análise de impactos ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela avaliação do ciclo de vida**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) – Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.

SEGRE, Thiago Stefano Passos. **Pavimentos flexíveis**: análise dos defeitos em função da sua origem e suas consequências na vida útil. 2019. 9 f. Trabalho Acadêmico (Projeto de Iniciação Científica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

SINDETRANS - Sindicato das empresas de transporte de cargas. 2018. **Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias**. Disponível em: <https://www.sindetransrp.com/noticias/conheca-os-13-principais-defeitos-do-pavimento-das/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SOARES, Sebastião Roberto.; SOUZA, Danielle Maia de.; PEREIRA, Sibeli Warmling. **Construção e meio ambiente**. Porto Alegre: ANTAC, 2006. v.7. 296 p.

SOUZA, Luciana de Paula. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. 2017. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2017.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Defining life cycle assessment**. US, 2010.

WILLERS, Camila Daniele; RODRIGUES, Luciano Brito; SILVA, Cristiano Alves da. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases nacionais. Produção**, v. 23, 2. ed. p. 436 - 447, 2013.