



AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO
NO SUBLEITO POR MEIO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS

Marina Donato

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Rio de Janeiro
Agosto de 2023

AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO
NO SUBLEITO POR MEIO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS

Marina Donato

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Aprovador por: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Márcio de Almeida D'Agosto

Marina Leite de Barros Baltar

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Michéle Dal Toé Casagrande

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2023

Donato, Marina

Avaliação das influências do comportamento hidromecânico no subleito por meio da Análise de Ciclo de Vida de pavimentos / Marina Donato. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XVI, 226 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 141-162.

1. Análise do Ciclo de Vida. 2. Subleito.
3. Comportamento Hidromecânico. I. Silva, Marcelino Aurélio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes.
- III. Título.

“Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis” (René Descartes).

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta tese de Doutorado não teria sido possível se não fosse o auxílio, a compreensão e o envolvimento de muitas pessoas e instituições. Quero aqui agradecer àqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar forças para seguir em frente durante os momentos difíceis.

À minha avó Neusa Donato (*in memorian*), com todo meu amor, por tudo que fez por mim ao longo da minha vida. Guardarei com muito carinho todos os conselhos e ensinamentos.

À minha mãe Rosana, e à minha irmã Anita, pelo apoio constante, carinho e confiança que sempre depositaram em mim; e pela compreensão em todo esse tempo de separação.

Aos meus irmãos João Henrique, Vinícius e Gabriel, pela paciência nos momentos de maior tensão e pelas palavras de conforto.

Aos meus padrinhos Paulo e Simone Oliveira, pelo suporte incondicional na busca dos meus objetivos; por me ampararem nos momentos difíceis, por me darem forças para suprir as minhas necessidades, e por me mostrarem o caminho nas horas incertas.

À tia Vanica e ao tio Zé, pela confiança e certeza de que tudo daria certo; pelas orações e, claro, pelo suporte financeiro. Muito obrigada!

Ao Cássio, que sempre confiou em mim e me incentivou, acreditando no sucesso desse trabalho.

À minha querida prima Júlia pelas sugestões, auxílio e disponibilidade em me ajudar quando precisei.

À toda a minha família, tios e primos; pela alegria de cada encontro, pelo encorajamento, incentivo e orações.

Ao meu orientador, o Professor Marcelino Aurélio Vieira da Silva, pela orientação e constante incentivo, e pelas correções e esclarecimentos relacionados à esta pesquisa. Agradeço imensamente pelos bons conselhos e pela oportunidade de contribuir no seu grupo de pesquisa, bem como pela proposição de um tema pelo qual possuo grande afinidade. Muito obrigada por acreditar no meu trabalho!

Ao meu colega de doutorado, Bruno Guida Gouveia, que me ajudou constantemente com seus ensinamentos e companheirismo nas produções científicas. Muito obrigada pela amizade ao longo desta jornada!

Ao meu colega Alexandre de Medeiros pela ajuda nos ensaios e esclarecimentos recorrentes às minhas dúvidas.

Aos amigos conquistados na turma de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro: Fábio Cerbino, Breno Garcia, Claudeny Santana, Fábio Martino, Isaias Seraco, Felipe Costa e Isabella Martins. Obrigada pelo incentivo para vencer as etapas impostas pelo curso, e por tornarem a tese mais fácil ao dividirem comigo seus conhecimentos!

Ao Professor Hostílio Rattón por todos os ensinamentos e compreensão nos mais diversos momentos.

À equipe de coordenação do curso de pós-graduação em Engenharia de Transportes: Prof. Glaydston Ribeiro, Jane Corrêa e Dona Helena, por todo o apoio na parte administrativa.

Aos queridos Professores Hostílio Rattón, Suzana Kahn, Paulo Emílio, Rômulo Orrico, Matheus Oliveira, Laura Motta e Lucas Caldas, pelas dúvidas tiradas e disposição em ajudar. Muito obrigada por me proporcionarem grande aprendizado e crescimento profissional nas disciplinas cursadas durante o curso!

Aos professores Dr. Márcio D'Agosto, Dra. Marina Baltar, Dr. Filipe Nascimento e Dra. Michéle Casagrande. Quero expressar meus sinceros agradecimentos à banca avaliadora da minha tese por suas valiosas sugestões e contribuições!

Aos professores do Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes da COPPE UFRJ pela contribuição ao desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos professores do curso de graduação em Engenharia de Transportes e do Departamento de Engenharia de Transportes, Química e de Minas da Universidade da Federal de Mato Grosso (UFMT) pela compreensão e auxílio.

Aos professores do curso de graduação em Engenharia Civil e do Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação, Automação, Telemática e Humanidades – DTECH, da Universidade da Federal de São João del-Rei (UFSJ), pela assistência e suporte.

Ao Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – Seção de Geotecnia Ambiental, na pessoa da Prof.^a Dra. Maria Cláudia Barbosa; e à Dra. Camila Bezerra Coelho pelo apoio e boa vontade para a realização dos ensaios de sucção. Agradeço ainda pela atenção e ensinamentos a respeito dos respectivos ensaios.

Agradeço, também, ao Fred Ferreira pelo trabalho de revisão dessa tese.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro mediante bolsa de estudo concedida.

E às demais pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentado à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO NO SUBLEITO POR MEIO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS

Marina Donato

Agosto/2023

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

Ao se avaliar a sustentabilidade de uma obra, é imprescindível fazer a verificação dos impactos ambientais. Desse modo, o objetivo desse estudo é investigar o efeito do comportamento hidromecânico dos materiais utilizados em subleitos por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV) de pavimentos, com o intuito de compreendermos os impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida dessas infraestruturas. O estudo de caso avaliou os efeitos da sucção e módulo resiliente em solos de subleitos, considerando-se diferentes critérios de dimensionamento e variações de área trincada (20%, 25%, 30%, 35% e 40%). O escopo da ACV limitou-se às fases de extração de insumos, fabricação de materiais, usinagem e construção, considerando-se a operação de equipamentos de engenharia. No que se refere aos impactos ambientais, avaliou-se as contribuições das alterações climáticas com foco na emissão de gases de efeito estufa, e no consumo de energia. Esta pesquisa ainda se propôs a levantar indicadores de desempenho ambiental, os quais poderão ser representados pela unidade funcional versus a sucção do solo, dividida em três categorias: ramo seco, ramo úmido e ótimo. De maneira geral, a partir dos cenários estudados, os resultados obtidos indicaram que na medida em que a sucção é reduzida, ou seja, que a umidade é aumentada, tem-se um acréscimo na emissão de CO₂ Eq.. Pode-se concluir que a utilização da ferramenta de ACV demonstrou eficaz, destacando a influência do comportamento hidromecânico dos solos na quantificação dos impactos ambientais associados às infraestruturas de transporte.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF HYDROMECHANICAL BEHAVIOR'S INFLUENCES AT THE SUBGRADES BY THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PAVEMENTS

Marina Donato

August/2023

Advisor: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Department: Transportation Engineering

When assessing the sustainability of a work, it is essential to verify the environmental impacts. Thus, the objective of this study is to investigate the effect of the hydromechanical behavior of the materials used in subgrade through the Life Cycle Assessments (LCA) of pavements, to understand the environmental impacts generated throughout the service life of these infrastructures. The case study evaluated the effects of suction and resilient modulus in subgrade soils, considering different design criteria and variations of cracked area (20%, 25%, 30%, 35% and 40%). The scope of the LCA was limited to the phases of scope extraction, material manufacturing, machining, and construction, considering the operation of engineering equipment. Regarding environmental impacts, the contributions of climate change were assessed with a focus on greenhouse gas emissions and energy consumption. This research also proposed to raise environmental performance indicators, which can be represented by the functional unit versus soil suction, divided into three categories of moisture content: dry, wet and optimum. In general, from the scenarios studied, the results obtained indicated that as the suction is reduced, that is, the moisture is increased, there is an increase in CO₂ Eq. emission. It can be concluded that the use of the LCA tool proved to be effective, highlighting the influence of the hydromechanical behavior of soils in quantifying the environmental impacts associated with transport infrastructures.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Formulação do problema.....	5
1.3 Justificativa e motivações.....	5
1.4 Premissas e hipóteses	7
1.5 Objetivos da pesquisa.....	8
1.6 Estrutura da tese	9
2. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	11
2.1 Considerações iniciais	11
2.2 Pesquisa bibliométrica sobre ACV.....	12
2.3 Conceitos e características.....	15
2.4 Elementos estruturais da ACV	16
2.4.1 Definição de objetivo e escopo	17
2.4.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	17
2.4.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	18
2.4.4 Interpretação.....	19
2.5 Método de abordagem de ACV.....	19
2.5.1 Banco de dados de apoio à ferramenta ACV	20
2.5.2 Ferramentas de <i>software</i> para ACV	21
2.6 Análise de ciclo de vida aplicada em pavimentos	22
2.6.1 Avaliação de impacto ambiental	26
2.6.2 Método AICV aplicado a pavimentos	29
2.6.3 Ferramentas de <i>software</i> para ACV aplicada à pavimentos.....	30
2.6.4 Unidade Funcional aplicada a pavimentos	30
2.6.5 Análise de sensibilidade e de incerteza	31
2.7 Considerações finais.....	32
3. COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO	34
3.1 Considerações iniciais	34
3.2 Sucção	35
3.2.1 Curva característica do solo	36
3.2.2 Fatores que influenciam a curva característica dos solos não saturados	38

3.2.3	Modelos matemáticos para o ajuste da curva característica dos solos não saturados.....	41
3.2.4	Métodos de medida e controle de sucção.....	43
3.3	Módulo de resiliência.....	44
3.3.1	Fatores que influenciam o módulo de resiliência.....	48
3.3.2	Módulo de resiliência em condição não saturada.....	51
3.3.3	Relação entre módulo de resiliência e sucção do solo.....	57
3.3.4	Relação entre o módulo de resiliência e a curva característica dos solos.....	70
3.4	Considerações finais.....	71
4.	PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	73
4.1	Considerações iniciais.....	73
4.2	Determinação dos materiais das camadas do pavimento.....	75
4.3	Caracterização mecânica e hidromecânica dos materiais.....	76
4.4	Dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento.....	76
4.5	Determinação do Inventário de Análise de Ciclo de Vida.....	78
4.6	Determinação da Análise do Impacto de Ciclo de Vida.....	80
4.7	Determinação dos indicadores de desempenho ambiental.....	81
4.7.1	Determinação dos indicadores de desempenho ambiental e o efeito da sucção.....	82
4.8	Análise de sensibilidade.....	82
4.9	Análise de incerteza.....	82
5.	ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	84
5.1	Considerações iniciais.....	84
5.2	Exposição dos dados.....	84
5.3	Resultados e discussões.....	89
5.3.1	Ensaio laboratoriais.....	90
5.3.2	Comportamento hidromecânico.....	105
5.3.3	Dimensionamento mecanístico-empírico.....	108
5.3.4	Inventário de Ciclo de Vida.....	110
5.3.5	Análise do impacto do ciclo de vida (AICV).....	119
5.3.6	Avaliação integrada entre desempenhos ambientais.....	120
5.3.7	Avaliação integrada entre desempenhos ambientais e o efeito da sucção.....	122
5.3.8	Análise de Sensibilidade.....	126

5.3.9	Análise de Incerteza	128
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	136
6.1	Considerações finais e limitações.....	136
6.2	Proposições para novos estudos	140
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
	APÊNDICE A	163
A.1	Ajuste da Curva Característica.....	163
A.2	Dados da caracterização hidráulica dos materiais do subleito	163
A.3	Dados de sucção, umidade (ótima, ramo seco e úmido) e módulo resiliente (M_R)	164
A.4	Dimensionamento de pavimentos	165
A.5	Quantitativo de material para construção da via	165
A.6	Quantidades de insumos obtidas SICRO (2023).....	166
A.7	Banco de dados para alimentar o <i>software</i> SimaPro e conversão das unidades	178
A.8	Alterações climáticas GWP_{100} : Impacto ambiental gerado pela infraestrutura	197
A.9	Itens classificados em categorias.....	215
A.10	Tabela Resumo da caracterização física e mecânica dos materiais para o subleito.....	219
	ANEXO I.....	220
I.	Caracterização dos materiais (revestimento, base e sub-base).....	220
II.	Crterios de classificação técnica do projeto de vias	221
III.	Denominação das siglas do <i>software</i> SimaPro e da biblioteca Ecoinvent	224

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução temporal do número de publicações na pesquisa bibliométrica.	13
Figura 2.2 – Mapa baseado em dados bibliográficos de ocorrência de palavras-chave desta pesquisa.....	14
Figura 2.3 – Fases da Análise do Ciclo de Vida.....	16
Figura 3.1 - Curva de retenção para diferentes tipos de solo.	39
Figura 3.2 – Efeito da estrutura na sucção do solo.....	40
Figura 3.3 – Efeito da histerese de um solo não saturado.	41
Figura 3.4 – Esquema de aplicação de tensão desvio aplicada repetidamente em uma amostra de solo qualquer e a sua correspondente deformação vertical resiliente.	45
Figura 3.5 – Deformação do corpo de prova submetido ao carregamento cíclico (adaptado de Han e Vanapalli, 2016a).....	46
Figura 4.1 – Proposta de procedimento metodológico desta pesquisa.	74
Figura 4.2 - Parâmetros de entrada para dimensionamento do pavimento: <i>software</i> MeDiNa.	77
Figura 5.1 – Ilustração das camadas dos pavimentos asfálticos conforme o método de dimensionamento.....	85
Figura 5.2 – Plataforma do pavimento asfáltico.....	87
Figura 5.3 – Curva granulométrica dos solos para o subleito.	90
Figura 5.4 – Composição granulométrica dos solos para o subleito.	91
Figura 5.5 – Curva de Compactação – solo 1.....	91
Figura 5.6 – Curva de Compactação – solo 2.....	92
Figura 5.7 – Curva de Compactação – solo 3.....	92
Figura 5.8 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 1 (M1): a) M1wot – ótima; b) M1ws – ramo seco; c) M1w1 – ramo úmido 1 e d) M1w2 – ramo úmido 2.....	98
Figura 5.9 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 2 (M2): a) M2wot – ótima; b) M2ws – ramo seco; c) M2w1 – ramo úmido 1 e d) M2w2 – ramo úmido 2.....	98
Figura 5.10 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 3 (M3): a) M3wot – ótima; b) M3ws – ramo seco; c) M3w1 – ramo úmido 1 e d) M3w2 – ramo úmido 2.....	99
Figura 5.11 – Solo 1 (M1): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.	100

Figura 5.12 – Solo 2 (M2): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.	100
Figura 5.13 – Solo 3 (M3): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.	101
Figura 5.14 – Solo 1 (M1): Curva característica.	103
Figura 5.15 – Solo 2 (M2): Curva característica.	103
Figura 5.16 – Solo 3 (M3): Curva característica.	104
Figura 5.17 – Solo 1: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.	106
Figura 5.18 – Solo 2: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.	106
Figura 5.19 – Solo 3: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.	107
Figura 5.20 – Ilustração das etapas do Inventário de Ciclo de Vida do estudo de caso.	111
Figura 5.21 – Razão entre consumo energético (MJ) e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.	121
Figura 5.22 – Razão entre CO ₂ Eq. (t) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.	121
Figura 5.23 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 1.	123
Figura 5.24 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 2.	123
Figura 5.25 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 3.	124
Figura 5.26 – Razão entre kg de CO ₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 1.	125
Figura 5.27 – Razão entre kg de CO ₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 2.	125
Figura 5.28 – Razão entre kg de CO ₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído – Solo 3.	126
Figura 5.29 – Impacto ambiental GWP100 por categoria.	128
Figura 5.30 – Análise de incerteza dos cenários, por meio do GWP100a, da AICV método CML, do intervalo de confiança de 95%: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3; d) Cenário 4; e) Cenário 5; f) Cenário 6; g) Cenário 7; h) Cenário 8; i) Cenário 9; j) Cenário 10; k) Cenário 11; l) Cenário 12; m) Cenário 13; n) Cenário 14 e o) Cenário 15.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Série de Normas ISO para ACV (contínua).....	15
Tabela 2.2 – Etapas de ACV e indicadores de impacto ambiental em estudos sobre pavimentos (contínua).	23
Tabela 2.3 – Categorias de impactos ambientais e indicadores.....	27
Tabela 2.4 – Diferentes equações para quantificar as emissões (continua).....	28
Tabela 3.1 – Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (contínua).	41
Tabela 3.2 - Técnicas para medição de sucção em solos.....	44
Tabela 3.3 - Modelos de Módulo Resiliente obtidos na literatura.....	47
Tabela 4.1 – Fator de conversão dos principais gases de efeito estufa em relação ao Potencial de Aquecimento Global.	81
Tabela 5.1 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 1.....	86
Tabela 5.2 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 2.....	87
Tabela 5.3 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 3.....	87
Tabela 5.4 – Materiais e serviços para construção do pavimento.	89
Tabela 5.5 – Classificação dos materiais do subleito – SUCS.	93
Tabela 5.6 – Classificação dos materiais do subleito – HRB.	94
Tabela 5.7 – Classificação dos materiais do subleito – MCT.....	95
Tabela 5.8 – Dados do ensaio mecânico dos solos e classificados de acordo com o MCT.	97
Tabela 5.9 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 1 (M1).....	109
Tabela 5.10 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 2 (M2).....	109
Tabela 5.11 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 3 (M3).....	109
Tabela 5.12 – Compatibilização das unidades entre a base de dados do Sicro e SimaPro (contínua).....	113
Tabela 5.13 – Dados de saída do SICRO: quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento.	116

Tabela 5.14 – Dados inseridos no SimaPro: quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento.....	117
Tabela 5.15 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – Todos os cenários.	118
Tabela 5.16 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – Todos os cenários.....	118
Tabela 5.17 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de sub-base – Todos os cenários.	118
Tabela 5.18 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de subleito – Todos os cenários.	119
Tabela 5.19 – Quantidades energia consumida e gases de efeito estufa emitida na fabricação dos insumos e no funcionamento dos equipamentos de engenharia na construção por quilômetro de pista construída (contínua).....	119
Tabela 5.20 – Análise de incerteza relacionada às alterações climáticas dos cenários estudados.	129

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Ainda que tenhamos conquistado, no século passado, as chamadas “boas práticas de fabricação” por diversas indústrias, mineradoras, siderurgias, usinas etc. espalhadas pelo planeta, no que se refere à adoção de processos fabris e de extração mineral/vegetal que possam mitigar, ao máximo, os danos causados ao meio ambiente e à sociedade como um todo, principalmente com relação aos dejetos e materiais descartados após cada atividade humana; e ainda, mesmo com o advento de ONGs (Organizações Não Governamentais) e órgãos criados pelos governos nacionais para fiscalizarem tais ações, o século 21 vem se apresentando, infelizmente, como um prolongamento do consumismo material desenfreado que foi instaurado no período anterior.

Historicamente, a sociedade humana deu início a este processo a partir da Revolução Industrial inglesa, em meados do século 18, ao empregar recursos energéticos não renováveis e a extrair recursos naturais sem um compromisso factual de preservação dos diversos biomas existentes, principalmente para que as futuras gerações possam ter um ambiente natural e urbano/rural mais saudáveis, livres dos riscos de degradação sem retorno de nossas reservas florestais e minerais, dos mananciais hídricos, da flora e fauna.

Em grande medida, estas ações promoveram e ainda acarretam emissões de gases poluentes, os quais degradam o meio ambiente e impulsionam a contaminação do ar, intensificando o efeito estufa e promovendo alterações climáticas que causam a destruição de milhares de ecossistemas. Pode-se afirmar que existem inúmeros conflitos e pouco consenso sobre as normas e condutas a serem efetivamente adotadas para o equacionamento entre a proteção ambiental e o chamado “desenvolvimento humano”. Por isso, e principalmente em razão dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre as Mudanças do Clima (IPCC), em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*, que é uma das inúmeras iniciativas internacionais que buscam compreender e enfrentar os desafios das mudanças climáticas por meio de colaboração científica (IPCC, 2014), poderemos orientar-nos quanto às informações mais recentes sobre o clima global.

No ano de 1987, o desenvolvimento sustentável foi definido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED), em inglês *World Commission on Environment and Development*, como aquele que atende às necessidades

do tempo presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem os seus próprios anseios e demandas de consumo material, podendo também ser empregado com o significado de melhora da qualidade de vida humana dentro dos limites da capacidade de suporte dos ecossistemas. Sendo assim, o desenvolvimento sustentável é pautado na ideia de que é possível sim, por meio da combinação da gerência de oferta e demanda de recursos produtivos, e através do incentivo à inovação e reorientação tecnológica, gerar crescimento econômico para as gerações atuais em consonância com as necessidades das próximas gerações (BRUNDTLAND *et al.*, 1987).

O Brasil possui uma boa colocação em relação aos custos para a mitigação dos impactos ambientais impostos, artificialmente, nos regimes do clima global, e isso graças a fatores como a sua matriz energética; a pesquisa científica realizada pelas universidades, empresas estatais e por determinados setores da iniciativa privada; sua robustez econômica e capacidade produtiva, e pelo seu grande aporte de reservas e recursos naturais ainda disponíveis em grande escala, dentre outros (IPEA, 2011). Por outro lado, o país está entre as sete maiores economias do mundo, as quais, juntas, correspondem a 65% das emissões globais de GEE (Gases do Efeito Estufa) (ROELFSEMA *et al.*, 2020). Desta forma, os problemas ambientais não podem ser tratados separadamente das questões energéticas.

O transporte brasileiro de bens e pessoas é responsável pela emissão de 22,8% de gás carbônico (CO₂) no país, sendo 89,9% desse total advindos do modo de transporte rodoviário. Desse modo, o setor de transporte traz para si a responsabilidade de adotar práticas sustentáveis nas suas operações (CNT, 2020). No Brasil, 65% do transporte de mercadorias e 95% do transporte de passageiros são realizados por meio do modo rodoviário. A extensão total da malha viária brasileira é de 1.720.909,0 km, sendo que apenas 213.500,0 km de rodovias pavimentadas (12,4%). Isso equivale a uma densidade rodoviária de 25,1 km/1000 km², com 99% de pavimento asfáltico (CNT, 2022).

Segundo D'Agosto (2015), as atividades que envolvem os sistemas de transportes contribuem para a emissão de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO) e partículas finas (PM2.5). Cada modo de transporte provoca poluição atmosférica e intensidade diferenciada, e a emissão de todos os tipos de poluentes pode ter sua intensidade agravada a partir das características dos veículos e das vias. Desse modo, a poluição atmosférica causada pelos

modos de transportes atinge níveis locais, regionais e globais que contribuem, de modo negativo, para as alterações climáticas que ocorrem de modo artificial e acelerado.

Portanto, a redução das emissões de poluentes do setor de transportes é essencial para melhorar a qualidade do ar e proteger a saúde humana, bem como para o bem-estar dos animais e a conservação de toda a flora que ainda resistem aos processos de degradação provocados pela civilização, a fim de se atenuar os impactos negativos das mudanças climáticas.

Ressaltamos que o transporte é essencial para a vida moderna. Porém, apesar de ser indispensável à sociedade nas distintas atividades sociais e econômicas, as diversas modalidades de deslocamento humano, por meio de veículos motorizados, causam múltiplos impactos ao meio ambiente. Além das emissões de poluentes atmosféricos causadas pelos veículos, a infraestrutura de transporte em si implica na realização de obras de engenharia de grande porte, tais como a construção de estradas, pontes e viadutos. Diante disso, a implantação e operação desses tipos de obras envolvem o consumo intenso de energia, e na maior parte das vezes proveniente de combustíveis fósseis.

Como toda obra de engenharia civil de grande escala, a construção de infraestruturas para sistemas de transportes interfere diretamente no meio ambiente de uma região e, na medida em que ocorre a sua realização, dá-se a ocupação do espaço físico natural, acarretando-se em desmatamentos, desapropriações de áreas urbanas e/ou rurais, terraplanagens, dentre outras interferências que modificam os meios físico, biótico e antrópico da região (D'AGOSTO, 2015; COENEN *et al.*, 2021).

Desse modo, constata-se a importância da verificação das implicações geradas ao meio ambiente pela implantação dessas infraestruturas. Segundo CRAWFORD *et al.* (2008), há inúmeros métodos para se avaliar os impactos ambientais de um determinado produto ou serviço. No setor de transporte, é exponencial o aumento de pesquisas e avaliações no intuito de se determinar os impactos ambientais gerados por todas as etapas do ciclo de vida das infraestruturas de transportes, desde a extração da matéria-prima até o descarte ou reciclagem dos materiais (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem ganhado destaque como a ferramenta mais apropriada para o cumprimento desse tipo de tarefa, já que é capaz de

quantificar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de existência, desde a sua exploração/remoção em reservas naturais, até a sua disposição final (AZARIJAFARI; YAHIA; BEN AMOR, 2016). Na literatura encontram-se estudos que avaliam a redução dos impactos no meio ambiente associados à construção de novas infraestruturas, a partir de diferentes insumos e verificação das diversas etapas do ciclo de vida (HUANG; BIRD; HEIDRICH, 2009; GULOTTA; MISTRETTA; PRATICÒ, 2019; CONG *et al.*, 2020). Nesse contexto, é essencial o surgimento de novos trabalhos que explorem a metodologia de ACV atrelada à infraestrutura de transportes que incorpore os principais progressos da mecânica dos pavimentos.

No aspecto mecânico, os pavimentos contam com importantes avanços no campo do dimensionamento das camadas componentes da estrutura e na caracterização de materiais. De acordo com Silva (2009), é consenso de que os pavimentos devem ser equacionados para que se tenham previsões de comportamento mais próximo da realidade. Como consequência, vários fatores são conhecidos por afetar a capacidade preditiva do projeto do pavimento e dos métodos de análise.

Entre esses fatores, destaca-se a água, a qual é absorvida pelo pavimento, e que poderá ser proveniente de precipitação pluviométrica, ou oriunda do meio circundante à estrutura do pavimento (infiltração lateral ou ascensão de águas subterrâneas) (SILVA, 2009). No caso específico das camadas do pavimento, a água tem um efeito direto nos materiais granulares, alterando o teor de umidade, o qual é influenciado pelas flutuações da infiltração, da temperatura, da variação sazonal do lençol freático e de condições climáticas (TAKEDA, 2006; NAZARIAN e YUAN, 2008; KHOURY, KHOURY e MILLER, 2009; SILVA, 2009; MEDINA e MOTTA, 2015; LIMA, MOTTA e ARAGÃO, 2019). Entre essas camadas, em geral, a influência da água se destaca nos solos que compõem o subleito de pavimentos, uma vez que estão situados na zona não saturada, ou seja, acima do nível do lençol freático; sendo, ainda, sensíveis às condições climáticas locais (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; SILVA, 2009; CASTRO, 2019).

Portanto, o subleito é considerado a camada de pavimento que geralmente é mais afetada pelos fatores mencionados, como a infiltração pela água, as variações de temperatura, a variação sazonal do lençol freático e condições climáticas, em geral (RODRIGUES, 1997; SILVA, 2009; CASTRO, 2019). Segundo Vargas (2020), essas

diversas interferências no subleito podem produzir grandes alterações nos teores de umidade e sucção nos solos, a depender do acesso da água na camada do pavimento e, por conseguinte, afetando o módulo de resiliência ao longo da vida útil. Por fim, a análise de desempenho mecânica e hidráulica de solos não saturados é denominada de comportamento hidromecânico.

1.2 Formulação do problema

No intuito de contribuir para o uso mais consciente e eficiente dos recursos energéticos, essa tese de Doutorado adotou como problema de pesquisa: “De que maneira o comportamento hidromecânico do subleito afeta a Análise de Ciclo de Vida (ACV) de projetos de pavimentos?”.

1.3 Justificativa e motivações

O clima tropical ocupa uma vasta área do território brasileiro, tendo como característica variações elevadas de temperatura, de umidade e de taxas de precipitação (DE CARVALHO *et al.*, 2015). Esses eventos ocasionam a variação do fluxo da água nos poros dos solos compactados de subleitos, interferindo diretamente no comportamento mecânico desses materiais em relação ao estado de tensões e de saturação do solo (TAKEDA, 2006; SILVA, 2009; NEVES, 2016; CASTRO, 2019), o qual poderá estar saturado ou não.

Segundo Medina e Motta (2015), os solos nunca são encontrados totalmente secos em estado natural, e sempre apresentam uma quantidade de água retida em seus espaços vazios, correspondente à gama de variações do teor de umidade ao longo do ano. Dito isso, ressalta-se que os procedimentos de dimensionamento de pavimentos, de acordo com a norma brasileira (DNIT, 2020), atualmente não preconizam considerações acerca da influência da água, pois a resistência e as relações tensão-deformação são tratadas fundamentalmente como independentes.

Em geral, os subleitos são dimensionados com a umidade ótima obtida, geralmente, pelos ensaios de compactação. Em situações de campo, esses materiais são compactados, também, próximos à umidade ótima. Apesar de admitidas as condições originais na avaliação estrutural do pavimento, após a compactação ocorre variação transiente da umidade que influencia na capacidade de suporte do solo. Logo, é enfatizada

a importância de se incorporar a mecânica dos solos não saturados no dimensionamento dos pavimentos.

Han e Vanapalli (2015) destacam que o aumento do grau de saturação de um solo compactado é um fator significativo na degradação das propriedades de resiliência, e desta constatação tem-se o módulo de resiliência (M_R). De acordo com Silva (2009) e Vargas (2020), dentre outros autores, indica-se que, em geral, o aumento de umidade pode ocasionar a diminuição do módulo de resiliência. De acordo com Ceratti *et al.* (2004), o módulo de resiliência é sensível ao estado de tensão no interior do subleito, e a sucção controla o estado de tensões em solos não saturados. Por essa razão, a medida da sucção parece fundamental para se entender o comportamento resiliente de solos não saturados empregados em subleitos compactados.

A utilização de princípios de sustentabilidade ao longo da vida útil de um pavimento vem crescendo por parte de pesquisadores científicos, empresas, organizações e instituições governamentais, embora este comportamento não seja algo novo para a finalidade de sanar ou mitigar as consequências negativas das ações humanas (VAN DAM *et al.*, 2015). De acordo com o IPEA (2016), mesmo com a ampla disseminação da ACV no cenário internacional, a ferramenta ainda é pouco difundida e aplicada no Brasil. Ainda há poucos estudos encontrados na literatura que abrangem as pesquisas de Ciclo de Vida em infraestrutura de transportes (NASCIMENTO, 2021).

Nesse sentido, a ACV tem ganhado destaque como a ferramenta mais apropriada para aferir os impactos ambientais na área de engenharia de transportes. Os processos e regras para a realização de uma ACV foram originalmente definidas pela Organização Internacional de Padronização (ISO), sendo as ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT NBR ISO, 2009a; ABNT NBR ISO, 2009b). Os critérios de procedimento de ACV são abrangentes, pois visam orientar análises de qualquer tipo de projeto. Portanto, para a sua aplicação em infraestruturas de transportes são necessárias algumas especificações mais precisas. As orientações dos procedimentos de ACV são geralmente desenvolvidas pelas indústrias de maior porte e de grande relevância para a economia de um país, mas, também, por outras partes interessadas da sociedade civil, como acadêmicos e órgãos públicos (HARVEY; MEIJER; KENDALL, 2014).

Diante da evolução das pesquisas a respeito do efeito da sucção no módulo de resiliência e de ACV, com o intuito de quantificar as contribuições dos impactos ambientais causados pelos projetos de infraestrutura de pavimentos, e a partir da pesquisa bibliométrica realizada para esta tese de Doutorado, não foi encontrado qualquer estudo significativo a respeito de uma metodologia que incorpore o comportamento hidromecânico em infraestruturas de pavimentos durante a sua vida útil, e que possa avaliar o consumo energético e as emissões de gases a partir de ACV.

1.4 Premissas e hipóteses

Para o desenvolvimento desse trabalho, algumas premissas foram adotadas:

- Os subleitos são normalmente compostos por materiais encontrados na região onde a infraestrutura será implantada, e são compactados na umidade ótima. Portanto, o pavimento é projetado e construído com a camada de subleito fixa que é conformado em campo pelos serviços de terraplenagem. Esses materiais raramente são substituídos, e quando apresentam um comportamento mecânico abaixo do esperado, aumenta-se a solicitação nas camadas superiores. Portanto, é de extrema importância compreender as características dos diferentes materiais de solos utilizados em camada de subleito de pavimentos.
- Porém, os projetos de pavimentos que avaliam as propriedades mecânicas dos solos sem levar em consideração a variação do efeito umidade e sucção, são questionáveis, haja vista que o pavimento fica exposto a intempéries. Logo, é um desafio para a comunidade acadêmica o entendimento do processo de saturação das camadas do subleito e os efeitos no módulo de resiliência com a variação do teor de umidade, cujo comportamento é chamado de hidromecânico. Portanto, os modelos que incorporam sucção geralmente são mais acurados na previsão do M_R em função do estado de tensões.
- O critério de decisão para seleção de determinado tipo de pavimento usualmente se baseia nas solicitações do tráfego em determinado tempo de serviço, na ação climática e nos custos de implantação. O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo calcular e verificar espessuras e compatibilizar os materiais de forma que a vida útil dele corresponda ao

período de projeto. Ressalta-se que raramente são verificados os impactos ambientais causados pelas escolhas desses materiais.

- A ACV é uma importante ferramenta para a tomada de decisão quanto à gestão ambiental estratégica, pois é possível avaliar o impacto ambiental de qualquer produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final, ou reuso. Por fim, e mais importante, será a partir das escolhas dos materiais empregados no dimensionamento do pavimento que poderemos avaliar a magnitude do impacto ambiental de um determinado processo ou projeto.

Considerando-se essas premissas, a hipótese a ser testada por essa tese é:

- Se a influência da sucção no módulo resiliente do subleito, por meio do comportamento hidromecânico, irá incorporar no procedimento metodológico, resultando-se em mudanças significativas nos aspectos estruturais do pavimento, e com impactos na Análise de Ciclo de Vida (ACV);
- Se, caso a sucção influenciar o dimensionamento do pavimento, será possível observar diferenças nos indicadores de ACV;
- Se os diferentes tipos de solos de subleito apresentam comportamento hidromecânico distintos, será possível constatar o efeito nos diferentes indicadores de ACV.

1.5 Objetivos da pesquisa

1.5.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é investigar o efeito do comportamento hidromecânico dos materiais utilizados nos subleitos na Análise de Ciclo de Vida de pavimentos, visando compreender os impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida dessas infraestruturas.

1.5.2 Objetivos específicos

- Propor um procedimento metodológico que incorpore a influência da sucção no módulo de resiliência dos materiais de subleitos através do comportamento

hidromecânico dos aspectos estruturais do pavimento, e de modo que se avalie seus efeitos por meio da Análise de Ciclo de Vida;

- Avaliar a influência das diversas porcentagens de área trincada do pavimento no dimensionamento, especificamente relativo à variação da espessura do revestimento;
- Avaliar de que modo a sucção nas camadas de subleito afetam o dimensionamento do pavimento e conseqüentemente sua ACV;
- Avaliar a influência do comportamento hidromecânico em subleitos em relação aos indicadores de ACV em função da sucção;
- Determinar e analisar indicadores de ACV em função da sucção para vários materiais que compõem distintas camadas de subleito.

1.6 Estrutura da tese

Esta tese está estruturada em seis capítulos, além das referências bibliográficas.

O Capítulo 1 é uma introdução que aborda, nas considerações iniciais, a temática da Análise de Ciclo de Vida (ACV), e o efeito do comportamento hidromecânico aplicado a infraestruturas de transportes. Além disso, é apresentado a formulação do problema, justificativas e motivações, a premissa e hipóteses. Por fim, é apresentado o objetivo da pesquisa e estabelecido o método científico.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre Análise de Ciclo de Vida como ferramenta para a verificação dos impactos ambientais, trazendo os conceitos principais e a proposta de aplicação em infraestruturas de transportes, especificamente para pavimentos rodoviários.

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos referentes às propriedades e características do comportamento hidromecânico de pavimentos. Nesse contexto, e para maior entendimento do comportamento hidromecânico, foram apresentadas, separadamente, as definições de sucção e módulo de resiliência. Ao final, foi indicada a relação entre a sucção e o módulo de resiliência.

No Capítulo 4, é apresentado o método da tese a partir de oito etapas propostas: determinação dos materiais das camadas do pavimento, caracterização mecânica e hidromecânica dos materiais, dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento, determinação do Inventário de Análise de Ciclo de Vida (IACV), determinação da Análise do Impacto de Ciclo de Vida (AICV), determinação dos indicadores de desempenho ambiental; análise de sensibilidade, e por fim, análise de incerteza.

No Capítulo 5, é apresentada a aplicação do procedimento metodológico proposto em um estudo de caso, com o objetivo de ilustrar a funcionalidade do modelo desenvolvido. Em um subtópico seguinte, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações de dimensionamento dos pavimentos pelo método mecanístico-empírico, levando-se em consideração diferentes materiais para a camada de subleito e o efeito do comportamento hidromecânico. Além disso, serão discutidos os impactos ambientais por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV); a avaliação integrada dos desempenhos ambientais; a determinação de indicadores ambientais que incorporam a sucção e a análise de sensibilidade e incerteza.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões do estudo realizado, incluindo os principais resultados obtidos e as considerações finais sobre a pesquisa. Além disso, serão discutidas as limitações encontradas durante a tese, destacando-se quaisquer restrições ou obstáculos enfrentados no decorrer do trabalho. Na sequência, serão apresentadas as propostas para trabalhos futuros, indicando-se possíveis direções para pesquisas adicionais que possam ampliar e aprofundar o conhecimento na área abordada.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas contendo todos os trabalhos utilizados na elaboração da tese.

2. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

2.1 Considerações iniciais

As origens da Análise de Ciclo de Vida (ACV) remontam ao final da década de 1960 e início dos anos 1970, quando estudos ambientais aplicados à perspectiva do ciclo de vida foram utilizados para estimar o impacto ambiental. O primeiro guia para a ACV foi publicado em 1993, intitulado de “Código de Prática”, e desenvolvido por um grupo de trabalhadores da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC), em inglês *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*. Posteriormente, surgiu um conjunto de normatizações internacionais elaborados pela *International Organization for Standardization* (ISO) (JENSEN *et al.*, 1997; IPEA, 2016).

A ACV é apontada como ferramenta de gestão com o intuito de identificar e gerenciar as principais fontes de impacto dentro da cadeia produtiva. Desse modo, a utilização desta metodologia no planejamento estratégico das empresas e corporações, em geral, permite a elaboração de indicadores que podem evidenciar pontos críticos de produtos, serviços ou processos e, se necessário, promover ações de mitigação e redução dos impactos. De acordo com Santos *et al.* (2019), as avaliações da ACV podem ocorrer em três grupos, sendo eles: econômica, ambiental e social; e são indispensáveis para se avaliar um empreendimento sob uma perspectiva de desenvolvimento sustentável.

As diversas transformações do meio ambiente no âmbito mundial são resultantes das práticas produtivas e do alto consumo descontrolado da população que, conseqüentemente, estão gerando impactos ambientais. Desse modo, para minimizar os impactos ambientais dos padrões de produção e consumo, novas perspectivas socioeconômicas, tecnológicas e de políticas ambientais devem estar em consonância com as discussões que vêm sendo desenvolvidas com o intuito de melhorar a qualidade de vida da sociedade.

De um modo geral, o mercado competitivo e as fiscalizações governamentais fazem com que as empresas apresentem projetos inovadores e estratégicos em relação a seus concorrentes. Esses diferenciais estão relacionados à qualidade e ao controle dos aspectos ambientais de seus produtos e processos. Desse modo, as empresas que não controlam os impactos ambientais negativos de seus processos podem sofrer penalizações jurídicas e banimento do mercado consumidor.

De acordo com o IPEA (2015), as oportunidades de uso de ACV no cenário brasileiro estão atreladas ao comércio exterior. As empresas brasileiras que competem no mercado internacional exercem grande influência e pressão no setor público, bem como em empresas rivais do setor privado, pois a ACV poderá agregar valor às marcas dos produtos industrializados e, assim, trazer boa reputação para as diversas marcas comerciais. Com relação às empresas nacionais, especificamente do setor primário, a ACV é adotada somente como ferramenta em processos de decisão interna, cujo intuito é quase que, exclusivamente, para se obter uma eficiência produtiva. Diante deste contexto, tem-se tornado cada vez mais recorrente avaliar o desempenho ambiental por meio da ferramenta ACV.

2.2 Pesquisa bibliométrica sobre ACV

Ao se avaliar a sustentabilidade de uma obra, é imprescindível fazer a verificação dos impactos ambientais. Desse modo, surge a prerrogativa do uso da Análise de Ciclo de Vida como ferramenta de avaliação de impactos que, aliada à complexidade do tema, impõe a delimitação do escopo para o levantamento de informações e dados, podendo ainda essa ferramenta abranger áreas não totalmente incluídas em um determinado projeto. Para uma boa análise e previsão do comportamento hidromecânico do pavimento, é importante, como já ressaltado, a compreensão do comportamento de solos não saturados que leve em consideração o módulo de resiliência, a umidade e a sucção do solo.

O procedimento desta pesquisa foi conduzido conforme apresentado por Nascimento (2021), contendo as seguintes etapas: projeto de pesquisa; compilação dos dados bibliométricos; análise e visualização.

O objetivo da pesquisa bibliométrica foi verificar se o tema de Análise de Ciclo de Vida apresenta possíveis correlações com a área de Pavimentos, e que possam ser relevantes no cenário científico. Dentro da avaliação proposta, verificou-se os principais autores e instituições, palavras-chave e revistas indexadas ao *Journal of Citation Reports* (JCR). Realizou-se a compilação dos dados com o auxílio do programa computacional *EndNote* até o mês de julho do ano de 2023. As bases de pesquisa utilizadas foram: *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*. Estabeleceu-se as seguintes palavras-chave:

“pavement” AND “life AND cycle AND assessment”. No total, foram encontrados 1.883 artigos, já se considerando a exclusão dos duplicados.

No aspecto temporal do período de 2020 a 2023, observa-se a tendência de crescimento exponencial do número de publicações na área correlatada acima, conforme apresentado na Figura 2.1.

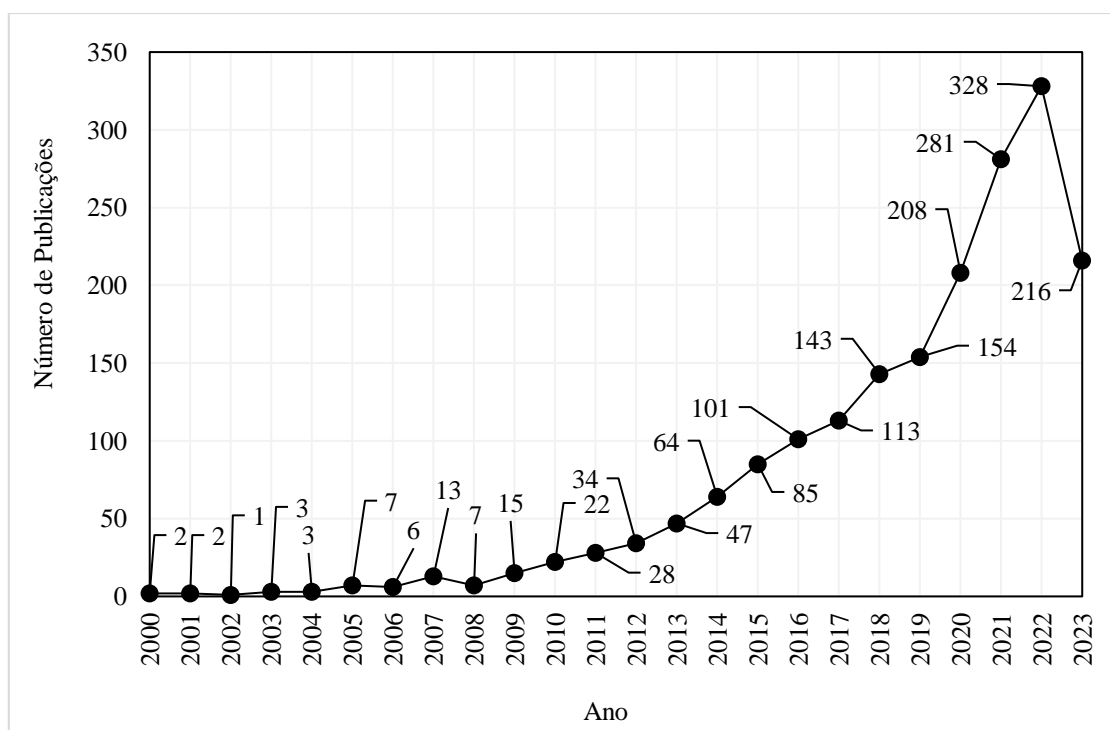


Figura 2.1 – Evolução temporal do número de publicações na pesquisa bibliométrica.

A partir de um banco de dados, aplicou-se filtros para uma avaliação mais precisa do tema. Como era de se esperar, dentro dos filtros aplicados com palavras-chave importantes para essa pesquisa, os resultados para a ocorrência desse tema foram, praticamente, quase inexistentes dentro das buscas vinculadas aos vocábulos Análise de Ciclo de Vida e Pavimento. Logo, os filtros aplicados foram “*suction*” (0 ocorrências); “*moisture content*” (19 ocorrências); “*saturation*” OR “*saturate*” (3 ocorrências); “*dimensioning* OR *dimension*” (93 ocorrências); “*resilient*” OR “*modulu*” (120 ocorrências); “*soil*” (140 ocorrências). Desse modo, foram avaliados os artigos obtidos pelos filtros, e nenhum deles contempla a metodologia proposta nesta tese de Doutorado.

Com o banco de dados da *Scopus*, utilizou-se o programa computacional *VOSviewer* para a verificação, o levantamento e a identificação dos principais *clusters*

2.3 Conceitos e características

A análise do impacto ambiental produzido por um sistema sob a abordagem do Ciclo de Vida considera todas as suas fases, desde a matéria-prima até o fim da vida útil desse sistema, e quantifica de forma abrangente os materiais e energia consumidos (LOIJOS, 2005). A Análise do Ciclo de Vida (ACV), no termo em inglês *Life Cycle Assessment* (LCA), é uma metodologia que tem a finalidade de avaliar o impacto ambiental causado por um produto ou serviço ao longo de sua vida útil para consumo.

De acordo com LI *et al.* (2019), as etapas de ciclo de vida da ACV recebem diferentes denominações, desde a fase de sua extração até a sua disposição final, e considera, inclusive, a reciclagem dos elementos que constituíam o sistema, o qual é intitulado “do berço ao berço” (em inglês: *from Cradle to Cradle*). A partir do escopo proposto e do objetivo da ACV, a abrangência das etapas pode ser parcial, tais como *from Cradle to Gate* (do berço ao portão), quando são consideradas as etapas de exploração e produção de insumos, produção de materiais e construção; e tais como *from Cradle to Grave* (do berço ao túmulo), quando abrangem as etapas do tipo anterior, adicionando-se as fases de uso/operação, manutenção/reabilitação e fim de vida, sem considerar a reciclagem total dos elementos que constituíam o sistema. Segundo Andrade (2016), a norma estabelece conceitos gerais, não particularizando técnicas específicas para cada fase da avaliação ou para um produto/serviço em particular.

As normas que contemplam a família ISO 14000 definem requisitos gerais para a condução da ACV (Tabela 2.1). A norma ISO 14040 (2009a) estabelece regras quanto a essa avaliação no que diz respeito aos aspectos ambientais, e potenciais impactos ambientais através do Ciclo de Vida do produto/serviço, desde a extração de matéria-prima, passando-se pela produção e seu uso até o tratamento de seu fim de vida, reciclagem e disposição final. A norma ISO 14044 (2009b) orienta as organizações para as melhorias relacionadas ao gerenciamento das atividades sob o aspecto de preservação ambiental, e por meio de critérios para as análises das simulações.

Tabela 2.1 – Série de Normas ISO para ACV (contínua).

Norma	Título	Ano
ABNT NBR ISO 14040	Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura.	2009
ABNT NBR ISO 14044	Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações.	2009

Tabela 2.1 – Série de Normas ISO para ACV (continuação).

Norma	Título	Ano
ABNT ISO/TR 14047	Avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto.	2016
ABNT ISO/TR 14049	Avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário.	2014
ABNT ISO/TS 14071	Avaliação do ciclo de vida: processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009.	2018

2.4 Elementos estruturais da ACV

A ACV é uma metodologia estruturada para determinar os tipos e a quantidade dos impactos gerados ao longo do Ciclo de Vida de um determinado sistema, ou seja, desde a extração dos recursos naturais até o uso e disposição final do produto.

Essa metodologia consiste em quatro fases principais, conforme apresentado na Figura 2.3 (ISO 14040, 2009a, p. 08):

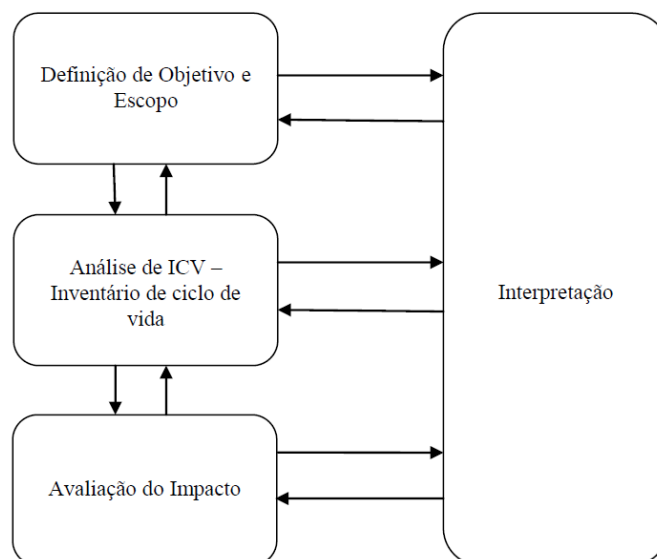


Figura 2.3 – Fases da Análise do Ciclo de Vida.

Fonte: ISO 14040 (2009a).

- i. Definição do objetivo e escopo do estudo, com a determinação de seus limites e nível de detalhamento;
- ii. Análise de inventário que abrange a coleta de dados e a estimativa dos impactos ambientais;

- iii. Avaliação dos impactos que estima os potenciais efeitos ambientais a partir das considerações sistêmicas das fases como um todo;
- iv. Interpretação dos resultados que permite as conclusões finais dos efeitos obtidos nas fases de análise de inventário e avaliação dos impactos.

2.4.1 Definição de objetivo e escopo

Segundo Nascimento (2021), a definição do objetivo e escopo envolve a identificação da extensão de um sistema produtivo, incluindo os processos esperados em seu ciclo de vida. Durante esta fase, são alinhadas algumas características, tais como: unidade funcional; limites do sistema; período de avaliação; categorias de impacto (social, econômico e/ou ambiental) e cenários alternativos (NASCIMENTO, 2021). As unidades funcionais são estabelecidas e são utilizadas nos fluxos de entrada/saída, o que viabiliza a comparação entre os diferentes projetos, por exemplo, a quilometragem (km) de vias construídas por CO_2eq emitido. Os limites do sistema estabelecem as fronteiras a serem consideradas nos estudos, podendo sobrepor-se às demais fases. O período de avaliação constitui os Ciclos de Vida das fases que serão examinadas (HASAN, WHYTE e JASSMI, 2019).

Como já mencionado anteriormente, a literatura prevê três categorias de impacto: social, econômico e/ou ambiental, podendo o escopo do trabalho se limitar ao estudo de algumas destas especialidades. Por último, os cenários alternativos propõem alcançar previsões adicionais de impactos a partir de técnicas que podem ser inseridas ao escopo da ACV, como, por exemplo, a complementariedade entre ferramentas; a utilização de modelos matemáticos; a comparação e extrapolação de parâmetros e variáveis; experimentos de laboratório e campo (LI *et al.*, 2019; HASAN, WHYTE e JASSMI, 2019).

2.4.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Segundo o IPEA (2016), a fase do inventário de Ciclo de Vida (ICV) de um produto é uma matriz representativa do sistema de produção deste produto, ou de um serviço, os quais consomem tempo e recursos financeiros para a sua construção. Para Whyte (2011), o processo de desenvolvimento do ICV envolve a mensuração das informações coletadas sobre as trocas de energia e recursos (fluxos de entrada e saída) com o meio ambiente, bem como as emissões de resíduos gerados durante todo o Ciclo

de Vida de um sistema produtivo. Esses dados são calculados por meio de unidades funcionais específicas.

O inventário de Ciclo de Vida pode ser montado utilizando-se diferentes abordagens. Esta fase é a mais longa e complexa, pois se produz uma base de dados para facilitar o acesso às informações. Contudo, de acordo com IPEA (2016), não existe repositório de dados de ACV com todas as informações sobre determinado Ciclo de Vida de um produto. Aproximações e o uso de diferentes bases de dados são necessários. Para Andrade (2016), um ICV permite uma visão geral das emissões de cada etapa do Ciclo de Vida, permitindo intervenções no sentido de diminuir as emissões de algumas etapas.

2.4.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) visa ao entendimento dos fluxos elementares presentes no inventário no formato de pegadas ou impactos ambientais. Esta etapa envolve a conversão do ICV em estimativas sistemáticas de impactos ambientais ponderados, e avaliados com base em indicadores analíticos. Em geral, possui uma tendência de ser altamente automatizada com a possibilidade de utilização de diversos *softwares*, a depender do produto analisado e dos impactos que se deseja verificar (HAUSCHILD *et al.*, 2018; HASAN, WHYTE e JASSMI, 2019).

O IPEA (2016) recomenda que os resultados da AICV devem ser expressos em escala anual, pois os indicadores de impactos no meio ambiente, em bases anuais, permitem a avaliação apurada de quais produtos e/ou serviços possuem menor impacto ambiental no sistema analisado, quando em comparação com outras análises ambientais.

A ISO 14044 (ISO, 2009b) contém etapas classificadas em obrigatórias e opcionais, que devem ser implementadas para que se desenvolva uma AICV. Desse modo, as etapas obrigatórias são:

- i. Seleção de categorias de impactos, categorias de indicadores e modelos de caracterização;
- ii. Classificação: é a associação dos fluxos com seus efeitos potenciais;
- iii. Caracterização: é o cálculo dos indicadores das categorias, quantificação das contribuições dos fluxos do inventário nas diferentes categorias de impactos. É

notório ressaltar que esses passos ocorrem, em sua maioria, no momento da escolha do *software* de ACV.

As etapas opcionais, não aprofundadas nesse trabalho, são:

- iv. Normalização;
- v. Definição de pesos para priorização de impactos;
- vi. Agrupamento.

2.4.4 Interpretação

Segundo a ISO 14044 (2009b), nesta fase os resultados da ICV e/ou AICV devem ser interpretados de acordo com o objetivo e escopo do estudo. Ainda, segundo a norma, a interpretação deve incluir as análises de sensibilidade (entradas, saídas e escolhas metodológicas significativas) e incertezas a respeito dos resultados que podem ser conduzidas. A análise de sensibilidade mostra o quão sensíveis são os resultados para o método adotado. A análise de incerteza quantifica a incerteza dos resultados. Conclusões e recomendações são também apresentadas. Geralmente, esta fase consiste em três elementos (LI *et al.* 2019):

- i. Identificação das questões relevantes com base nos resultados de ICV e AICV;
- ii. Avaliação da sensibilidade desses problemas e verificações de consistência e completude;
- iii. Conclusões, recomendações e limitações para o estudo.

Por fim, Nascimento (2021) observa que a interpretação é um processo iterativo na prática, pois é necessário retroalimentar as outras três fases da ACV após cada interação consecutiva do processo de avaliação.

2.5 Método de abordagem de ACV

Existem diversas maneiras de conduzir uma ACV, e a escolha do método de avaliação é feita tomando-se como base a complexidade dos sistemas e das diferentes condições e características ambientais existentes em cada região. Os modelos comumente utilizados são conhecidos como métodos para AICV (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida). De acordo com Huppés e Van Oers (2011) os métodos de AICV podem ser divididos em quatro níveis de avaliação: *activity*, *intervention*, *midpoint* e *endpoint*. Logo,

a *Activity* refere-se às atividades realizadas em cada fase do Ciclo de Vida de um produto ou processo. Essas atividades podem incluir extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e descarte. Adiante, a *Intervention* refere-se às intervenções que podem ser feitas em cada atividade do Ciclo de Vida para reduzir seu impacto ambiental. Por exemplo, a utilização de energia renovável na produção de um produto pode ser uma intervenção para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Em seguida, *Midpoint* é um ponto intermediário no Ciclo de Vida de um produto ou processo em que é avaliado o impacto ambiental de uma atividade específica. É onde as emissões de gases de efeito estufa, por exemplo, são quantificadas. Por fim, o *Endpoint* é o resultado final da avaliação de impacto ambiental de um produto ou processo. É onde os impactos ambientais são avaliados como um todo, como a mudança climática, a acidificação, a eutrofização, entre outros (HUPPES e VAN OERS, 2011; SANTOS *et al.*, 2015a).

Os métodos para AICV utilizados na Europa estão descritos no *International Reference Life Cycle data System*, o ILCD handbook (EC-JRC, 2010), e tem a finalidade de fornecer informações e recomendações da ACV, e apresenta uma análise geral dos seguintes métodos de AICV: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP 1997, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity 07, TRACI e MEEuP.

Os pesquisadores Mendes, Bueno e Ometto (2016) realizaram o levantamento dos principais métodos de AICV mais utilizados a partir de artigos científicos levantados na base de dados *Web of Knowledge*. Os autores realizaram uma revisão sistemática e identificaram os métodos mais utilizados e citados: CML, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox e IMPACT World+.

2.5.1 Banco de dados de apoio à ferramenta ACV

O banco de dados de apoio à ferramenta ACV é constituído por uma ampla biblioteca de inventários com informações detalhadas sobre produtos e serviços, como matéria-prima; energia; extração de recursos; fornecimentos de materiais; produtos químicos; metais; agricultura; gestão de resíduos; transporte e combustível, dentre outros. Sendo assim, o objetivo desse banco de dados é fornecer informações precisas e abrangentes que permitam a quantificação dos impactos ambientais associados aos

insumos e composições utilizados em diferentes processos de produção, desde a extração das matérias-primas até o descarte final.

Esses bancos de dados de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) são geralmente integrados em *softwares* para ACV, os quais podem incluir mais de um banco de dados. Ademais, esses bancos de dados são constantemente atualizados à medida que novas informações e tecnologias surgem, além da inclusão de informações de novos países em diferentes regiões do mundo, como o Brasil.

Curran (2006) listou alguns bancos de dados de apoio à ferramenta ACV: *Australian Life Cycle Inventory Data Project; BUWAL 250; Canadian Raw Materials Database; DuboCalc; Dutch Input Output; Ecoinvent; Eco-Quantum; EDIP; Franklin US LCI; German Network on Life Cycle Inventory Data; ITRI Database; IVAM LCA Data e Japan National LCA Project.*

O Ecoinvent é considerado uma das melhores bases de dados de ICV, pois possui código aberto; o que significa que está disponível de forma gratuita para download. Além disso, o Ecoinvent versão 3.9 contém mais de 18.000 conjuntos de dados de ICV com o repositório que abrange setores de nível global e regional, incluindo o Brasil. A estrutura do banco de dados permite que os usuários rastreiem os impactos de seus produtos em toda a cadeia de suprimentos e entendam seus resultados (Ecoinvent, 2023).

Consideramos importante que os pesquisadores utilizem as informações fornecidas pelo banco de dados de forma crítica e contextualizada, levando-se em conta as limitações e as incertezas associadas aos dados disponíveis, bem como as particularidades das diferentes regiões e setores industriais avaliados. Além disso, é fundamental verificar a transparência e a autenticidade na coleta das informações, e também com relação à modelagem adotada para se garantir que as análises de ACV sejam confiáveis e consistentes.

2.5.2 Ferramentas de *software* para ACV

Existem diversas ferramentas de *software* disponíveis para investigação de ACV com o propósito de simplificar o levantamento do inventário, realizar a avaliação de impactos ambientais e interpretar os resultados. Em geral, esses *softwares* variam de

acordo com os recursos fornecidos, a complexidade no seu manuseio e o custo para a sua aquisição.

De acordo com Andrade (2016), Alzard *et al.* (2019), Nascimento (2021) e Souza (2017), os *softwares* mais usados para a construção da ACV, e que facilitam a compilação dos dados de inventário são: *PaLATE*, *PE-2*, *EIO-LCA*, *GREET*, *GABI*, *RoadCO₂*, *SimaPro*, *OpenLca*, *UmbertXT* e *Athena Pavement LCA*.

Geralmente, essas ferramentas possuem bases de dados já levantadas para alguns processos, enquanto outros *softwares* apresentam a sistematização do modelo, o que permite orientar o usuário a partir da interface gráfica interativa (ANDRADE, 2016).

Para Guida, Donato e Silva (2022) as utilizações destas ferramentas comerciais dificultam a interpretação dos dados e a avaliação de requisitos de qualidade, principalmente os *softwares* que possuem bancos de dados próprios e são, raramente, compatíveis com a realidade dos países em desenvolvimento. Por esse motivo, as comparações entre diferentes estudos devem ser feitas com cautela, pois cada método pode usar um procedimento diferente para estimar os impactos ambientais. Além disso, é importante observar que nem todos os métodos são capazes de gerar indicadores para todos os tipos de impacto ambiental. Outra questão importante se faz quanto à dependência dos tipos de materiais e serviços que compõem o inventário, uma vez que determinado método específico poderá ser mais ou menos apropriado para a sua utilização.

2.6 Análise de ciclo de vida aplicada em pavimentos

Segundo Harvey *et al.* (2014), a ACV ainda se encontra no estágio inicial em aplicação em infraestruturas de transportes. O primeiro estudo de ACV em infraestruturas de pavimentos foi realizado por Roudebush, em 1996, a partir de um projeto solicitado pela *Portland Cement Association* com o intuito de realizar uma análise de Ciclo de Vida de infraestruturas de pavimento de concreto e de asfalto. O primeiro periódico revisado pelos pares sobre ACV foi publicado pelos finlandeses Horvath e Hendrickson em 1998 (ROUDEBUSH, 1996; SANTERO *et al.*, 2010; INYIM *et al.*, 2016).

De acordo com Inyim *et al.* (2016) e Araújo, Santos e Arguelles (2020), o foco principal dos estudos de ACV sobre infraestruturas de pavimentos, publicados nas últimas

duas décadas, tem sido a comparação de pavimentos, variando-se o tipo de revestimento com misturas asfálticas, concreto e materiais reciclados (*Reclaimed Asphalt Pavement - RAP*).

Na literatura encontra-se diversas pesquisas realizadas que utilizam a metodologia ACV a fim de se avaliar os impactos gerados por pavimentos. Apresenta-se, a seguir, na Tabela 2.2, uma breve compilação de estudos que empregaram abordagens similares que o trabalho desta tese se propôs a desenvolver:

Tabela 2.2 – Etapas de ACV e indicadores de impacto ambiental em estudos sobre pavimentos (contínua).

Estudos	Etapas do Ciclo de Vida					Indicadores Climáticos									
	Extração/Produção	Transporte de materiais	Construção	Uso	Manutenção	Reciclagem	Gases de efeito estufa (CO ₂ eq)	Consumo energético (MJ)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Metano (CH ₄)	Óxidos de Enxofre (SO _x)	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Material Particulado (PMX)	Óxido Nitroso (N ₂ O)
Mrueh (2000)	•	•	•	•	•		•								
Nisbet <i>et al.</i> (2000)	•	•						•	•	•		•	•		
Stripple (2001)	•	•	•	•	•		•	•		•					•
Park (2003)	•	•	•	•	•		•	•					•		
Treloar (2004)			•	•	•		•								
Athena (2006)	•	•			•		•	•		•					•
Birgisdóttir <i>et al.</i> (2006)	•	•	•	•	•		•						•		
SUSCON (2006)	•	•	•	•	•		•								
Garraín e Vidal (2008)	•	•					•								
Huang <i>et al.</i> (2009a)	•	•	•					•	•			•	•		•
Huang <i>et al.</i> (2009b)	•				•		•								
White <i>et al.</i> (2010)	•	•					•								
Weiland e Muench (2010)	•	•	•		•		•	•	•	•	•	•	•	•	•
Milachowski <i>et al.</i> (2011)	•	•			•		•								
Loijos (2011)	•	•	•	•	•		•								
Cass e Mukherjee (2011)	•	•					•								
Huang <i>et al.</i> (2012)	•	•			•		•								
Melanta <i>et al.</i> (2012)	•	•					•								
Yu <i>et al.</i> (2012)	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Yu <i>et al.</i> (2013)		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
Chou <i>et al.</i> (2013)	•				•			•	•				•	•	
Yu <i>et al.</i> (2014)		•	•	•		•		•							
Araújo <i>et al.</i> (2014)	•	•	•	•	•	•	•								

Tabela 2.2 – Etapas de ACV e indicadores de impacto ambiental em estudos sobre pavimentos (continuação).

Estudos	Etapas do Ciclo de Vida						Indicadores Climáticos								
	Extração/Produção	Transporte de materiais	Construção	Uso	Manutenção	Reciclagem	Gases de efeito estufa (CO ₂ eq)	Consumo energético (MJ)	Dióxido de Carbono (CO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Metano (CH ₄)	Óxidos de Enxofre (SO _x)	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Material Particulado (PMX)	Óxido Nitroso (N ₂ O)
Santos <i>et al.</i> (2015a)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Santos <i>et al.</i> (2015b)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Liu <i>et al.</i> (2015)	•	•	•	•	•	•	•								
Mauro <i>et al.</i> (2016)	•	•	•	•	•	•		•	•	•		•	•	•	•
Chen <i>et al.</i> (2016)	•		•	•		•			•	•	•	•	•	•	•
Butt <i>et al.</i> (2016)	•	•	•				•	•	•		•				•
Chong e Wang (2017)	•	•	•	•	•	•	•	•							
Santos <i>et al.</i> (2017b)	•	•	•	•	•	•	•								
Moretti <i>et al.</i> (2017)	•	•													
Liu <i>et al.</i> (2018)	•		•				•								
Hong <i>et al.</i> (2018)	•	•	•	•	•	•		•							
Gulotta <i>et al.</i> (2019)	•	•	•	•	•	•		•							
Wang <i>et al.</i> (2019)	•	•	•	•	•			•	•		•				
Cong <i>et al.</i> (2020)	•	•	•		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
Vega <i>et al.</i> (2020)	•	•	•				•	•							
Huang <i>et al.</i> (2021)	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•	•	•
Ma <i>et al.</i> (2021)		•	•		•		•	•							
Bressi <i>et al.</i> (2022)	•	•	•				•	•							
Salehi <i>et al.</i> (2022)	•	•					•	•							
Liu <i>et al.</i> (2023)	•	•	•	•			•	•	•		•				•
Osorto e Casagrande (2023)	•	•	•				•	•		•				•	•

Fonte: Adaptado de Barandica *et al.* (2013); Nascimento *et al.* (2020); Gouveia, Donato e Silva (2022), Donato *et al.* (2022), Liu *et al.* (2023) e Osorto Casagrande (2023).

Foram analisados um total de 44 artigos científicos que abordam estudos de ACV aplicados em pavimentação. Ao examinar as pesquisas, foram observadas as etapas do ciclo de vida adotadas e os indicadores de impacto ambiental utilizados. Com relação às etapas do ciclo de vida, constatou-se que os artigos analisados adotaram as seguintes etapas: Extração/Produção – 26 (59,09%); Transporte de materiais – 40 (90,91%); Construção – 40 (90,91%); Uso - 23 (52,27%); Manutenção – 28 (63,64%) e Reciclagem – 14 (31,82%). Em relação aos indicadores climáticos, observou-se que os artigos adotaram: Gases de efeito estufa (CO₂Eq) – 32 (72,73%); Consumo energético (MJ) – 19

(43,18%); Dióxido de Carbono (CO₂) – 19 (43,18%); Monóxido de Carbono (CO) – 11 (25,00%); Metano (CH₄) – 15 (34,09%); Óxidos de Enxofre (SO_x) – 10 (22,73%); Óxidos de Nitrogênio (NO_x) – 14 (31,82%); Material Particulado (PM_x) – 8 (18,18%) e Óxido Nitroso (N₂O) – 13 (25,00%).

A ACV aplicada para pavimentos depende dos parâmetros de entrada para definir as características do modelo, tais como, especificações de projeto de pavimento; fluxos de materiais e energia; impactos ambientais, dentre outros. A precisão dos resultados de ACV depende da confiabilidade dos dados utilizados na caracterização das entradas (*inputs*).

A partir da metodologia ACV, é possível determinar os tipos e quantidades dos impactos gerados ao longo do Ciclo de Vida de uma cadeia de suprimentos, examinando-se os *inputs* e *outputs* de um produto ou sistema. Segundo Harvey *et al.* (2014); Chong e Wong (2017); Chong (2018); Hasan, Whyte e Jassmi (2019) e Nascimento *et al.* (2020), no caso de pavimentos, o Ciclo de Vida pode conter as seguintes etapas:

- i. Exploração dos insumos e seu transporte;
- ii. Fabricação e usinagem dos materiais, e o transporte dos materiais do pavimento;
- iii. Construção do pavimento;
- iv. Conservação e manutenção;
- v. Uso;
- vi. Reciclagem, demolição ou reconstrução;
- vii. Fim da vida útil.

Contudo, em razão das recorrentes dificuldades de um estudo englobar todas as fases de vida de um pavimento, costuma-se efetuar uma simplificação no escopo, a fim de se analisar, apenas, parte de todo o ciclo de vida do pavimento. De acordo com Nascimento (2021), a partir dos critérios adotados, os mesmos insumos (mão-de-obra; materiais; equipamentos e energia) geram diferentes saídas em cada fase do Ciclo de Vida. Ao final, considera-se que esta ferramenta determina o quão danoso pode ser os impactos gerados pela vida útil do pavimento.

2.6.1 Avaliação de impacto ambiental

As categorias de impactos, indicadores e modelos de caracterização que integram a avaliação de impacto ambiental devem estar em consonância com os objetivos estabelecidos para a ACV, e conforme constituído pela ISO 14044 (ISO, 2009b). A seleção dessas categorias deve estar relacionada ao sistema de produto ou processo em estudo, levando-se em conta o objetivo e o escopo.

De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2009a), ISO 14044 (ISO, 2009b) e Aryan, Dikshit e Shind (2023), as categorias geralmente relacionadas aos estudos de ACV são:

- Consumo de recursos naturais: inclui-se nesta categoria recursos materiais e energéticos (renováveis ou não renováveis);
- Alterações climáticas: provocadas pelo acúmulo de determinados gases na atmosfera que retêm parte da radiação infravermelha emitida pela Terra. Esta radiação infravermelha é parcialmente absorvida pelos GEE (Gases de Efeito Estufa) e, conseqüentemente, mantidos na atmosfera em vez de serem liberados no espaço, provocando o aumento das temperaturas médias globais.
- Degradação de ozônio da estratosfera: Consiste na redução da quantidade de ozônio (O₃), gás altamente reativo e instável, presente na atmosfera devido à reação com alguns gases. Contudo, a estratosfera é vital para o nosso planeta, pois esta camada que envolve a Terra tem a capacidade de absorver radiação Ultravioleta (UV), a qual é altamente degradante para a vida como nós a conhecemos;
- Acidificação: consiste no aumento do teor de acidez da atmosfera devido à emissão de gases ácidos que são dissolvidos pela umidade atmosférica, e que retornam à crosta terrestre na forma de ácidos;
- Eutrofização: adição de nutrientes de nitrogênio e fósforo nos corpos de água e nos solos, em decorrência de rejeitos que contêm esses elementos químicos;
- Toxicidade: decorrente do descarte de rejeitos tóxicos no meio ambiente. Em geral, são consideradas, em separado, as toxicidades provocadas pelos humanos e, neste caso, denomina-se ecotoxicidade, a qual poderá ser em meios aquáticos, aéreos e/ou terrestres.

De acordo com o IPCC (2014) e Aryan, Dikshit e Shinde (2023), as categorias de impacto e os indicadores comumente utilizados em pavimentação são aqueles mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Categorias de impactos ambientais e indicadores.

Categoria de Impacto	Exemplos de dados ICV	Fatores
Esgotamento abiótico	Quantidade de minerais e combustíveis fósseis	ADP
Alterações climáticas	Quantidade de CO ₂	GWP
Acidificação	Quantidade de SO _x e NO _x	AP
Eutrofização	Quantidade de PO ₄ e N ₂ O	EP
Formação foto-oxidante	Quantidade de NMHC	POCP
Esgotamento do ozônio estratosférico	Quantidade de HCFC	ODP

Fonte: IPCC (2014).

Nota: ADP – Abiotic Depletion Potential; GWP – Global Warming Potential; AP – Acidification Potential; EP – Eutrophication Potential; POCP - Photo-Oxidant Creation Potential; ODP - Ozone Depletion Potential; SOX - Óxido de enxofre; NOX - Óxido de nitrogênio; PO4 – Fosfato; NO2 – Dióxido de Nitrogênio; NMHC – Hidrocarbonetos não metano; HCFC – Hidroclorofluorcarbonos.

Diferentes categorias de impacto podem ser relevantes na avaliação das implicações ambientais de diferentes produtos ou processos. Entretanto, se esta etapa for mal elaborada poderá afetar os resultados do estudo de ACV. Desse modo, o cálculo dos indicadores das categorias deve ser realizado de maneira a se padronizar a apresentação dos resultados (ISO, 2009b).

Diante disso, para se lidar com essas questões e possibilitar a comparação de diferentes tipos e quantidades de GEE utiliza-se o Potencial de Aquecimento Global (GWP). Logo, foi estabelecido que para cada categoria há diversos elementos de impacto ambiental, e que algum deles servirá como referência para que os demais gases possam ser avaliados. Sendo assim, a unidade desse indicador tem como parâmetro, estabelecido de forma arbitrária, a quantidade de energia que uma tonelada (1t) de dióxido de carbono (CO₂) poderá ser absorvida em um dado período em anos. Diversos GEE são gerados por uma variedade de processos. No entanto, mais de 98% das toneladas emitidas são compostas por (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2014; VAN DAM *et al.*, 2015; CHONG, *et al.*, 2023; PLATI e TSAKOUMAKI, 2023).

Para os indicadores ambientais são atribuídos pesos que representam a intensidade do impacto ambiental a cada categoria, de modo a apresentar resultados comparáveis. Dentre as várias técnicas de ponderação, a US-EPA – *United States Environmental*

Protection Agency atribui o peso 5 aos fatores das categorias de indicadores ADP, AD, EP e OLD; o peso 6 à categoria de indicador PCOP; e o peso 16 à categoria “alterações climáticas” – GWP. (HUPPES e VAN OERS, 2011; ANDRADE, 2016). Logo, constata-se que a categoria de maior relevância é a de “alterações climáticas”.

A metodologia proposta pelo IPCC (2006) combina informações sobre a extensão em que uma atividade ocorre com coeficientes que quantificam as emissões ou remoções por unidade de atividade (Alzard *et al.*, 2019). A (Equação 2.1 mostra a forma matemática geral para estimar as emissões de carbono.

$$Emiss\tilde{a}o = \sum_{i=1}^n DA_i EF_i \quad \text{(Equa\c{c}\~{a}o 2.1)}$$

Em que:

DA_i s\~{a}o os dados da atividade;

EF_i \c{e} o fator de emiss\~{a}o associado \~{a} atividade i .

No geral, a diferentes equa\c{c}\~{o}es s\~{a}o usadas para acomodar as diversas fontes de emiss\~{a}o em cada fase da infraestruturade um pavimento. Na fase de constru\c{c}\~{a}o e parte da fase de manuten\c{c}\~{a}o e reabilita\c{c}\~{a}o, os impactos ambientais a serem considerados costumam ser procedentes da combust\~{a}o. Assim, a literatura apresenta v\~{a}rias propostas para o c\~{a}lculo das emiss\~{o}es nas diferentes etapas do Ciclo de Vida, quando comumente \c{e} utilizado as equa\c{c}\~{o}es do IPCC (2006) (Tabela 2.4) (ALZARD *et al*, 2019).

Tabela 2.4 – Diferentes equa\c{c}\~{o}es para quantificar as emiss\~{o}es (continua).

Etapa	Fonte de Emiss\~{a}o	Equa\c{c}\~{o}es	
Pr\c{e}-constru\c{c}\~{a}o, Constru\c{c}\~{a}o, Manuten\c{c}\~{a}o e Reabilita\c{c}\~{a}o.	Material	$E_1 = [Q \times d] \times EF_i(material)$	Equa\c{c}\~{a}o 2.2
	Equipamento	$E_1 = [FCR (equip.) \times Q \times t] \times EF(equip.)$	Equa\c{c}\~{a}o 2.3
	Transporte	$E_1 = [m \times s] \times EF_i(transporte)$	Equa\c{c}\~{a}o 2.4
Opera\c{c}\~{a}o	Ve\c{u}culo em movimento (combust\c{u}vel f\~{o}ssil)	$E_2 = [FCR (VMcf) \times V \times s \times q] \times EF (VMcf)$	Equa\c{c}\~{a}o 2.5
	Ve\c{u}culo em movimento (eletricidade)	$E_2 = [FCR (VMe) \times V \times s \times q] \times EF (VMe)$	Equa\c{c}\~{a}o 2.6

Tabela 2.4 – Diferentes equações para quantificar as emissões (continuação).

Operação	Sinais de Trânsito	$E_2 = [P \times q \times p] \times EF \text{ (energia)}$	Equação 2.7
	Iluminação da estrada		
	Irrigação	$E_2 = [T_x \times q \times D] \times EF \text{ (I)}$	Equação 2.8
	Bombeamento de águas pluviais	$E_2 = [F \times q \times D] \times EF \text{ (energia)}$	Equação 2.9
	Sequestro (remoções)	$S = [q_t] \times ASR$	Equação 2.10

Fonte: Adaptado Alzard *et al.* (2019).

Nota: E_1 : emissão ($kg\ CO_2eq$), Q : quantidade (m^3), d : densidade ($\frac{kg}{m^3}$), $EF_i(material)$: fator de emissão associado à atividade i ($\frac{kg\ CO_2eq}{kg\ material_t}$), $FCR (equipamento)$: taxa de consumo de combustível ($\frac{L\ combust.}{Eq.\ hr}$), t : tempo de duração (hr), $EF (equipamento)$: fator de emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{L\ combust.}$), m : massa (kg), s : distância (km), $EF_i(transporte)$: fator de emissão associado à atividade i ($\frac{kg\ CO_2eq}{kg\ material.km}$), E_2 : emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{ano\ de\ refer\ência}$), $FCR (VMcf)$: taxa de consumo de combustível fóssil ($\frac{kW\ Combustível\ fóssil}{km.veículo}$), V : volume de tráfego, q : quantidade ($\frac{veículo}{ano\ de\ refer\ência}$), $EF (VMcf)$: fator de emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{kW\ Combustível\ fóssil}$), $FCR (VMe)$: taxa de consumo de combustível ($\frac{kW\ Eletricidade}{km.veículo}$), V : volume de tráfego, $EF (VMe)$: fator de emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{kW\ Eletricidade}$), P : potência (watt), p : período ($\frac{hr}{dia}$) ($\frac{365,25 \times (\frac{dia}{ano\ de\ refer\ência})}{1000 \times (\frac{Watt}{kW})}$), $EF (energia)$: fator de emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{kWh}$), T_x : taxa de irrigação ($\frac{L}{dia.árvore}$), D : duração ($\frac{hr}{ano\ de\ refer\ência}$), $EF (I)$: fator de emissão ($\frac{kg\ CO_2eq}{L}$), F : força ($\frac{kW}{bombar}$), S : sequestro ($\frac{kg\ CO_2eq}{ano\ de\ refer\ência}$), q_t : quantidade de árvores, ASR : Taxa de sequestro anual ($\frac{kg\ CO_2eq}{árvore.ano\ de\ refer\ência}$).

As categorias de impacto comuns usadas em vários estudos de ACV são: Potencial de Depleção Abiótica Fóssil (ADP fóssil); Potencial de Acidificação (AP); Potencial de Eutrofização (EP); Potencial de Aquecimento Global (GWP); Potencial de Toxicidade Humana (HTP); Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (ODP) e Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (TEP).

Por fim, de acordo com Inyim *et al.* (2016) e Aryan, Dikshit e Shinde (2023), na avaliação dos estudos de ACV de pavimentos, o consumo de energia e as emissões de GEE, especialmente as emissões de carbono, foram os principais impactos ambientais.

2.6.2 Método AICV aplicado a pavimentos

Para Aryan, Dikshit e Shinde (2023) os métodos mais utilizados de AICV são ReCiPe e CML, pois ambos os métodos possuem fatores de normalização global, e consistem em várias categorias de impacto adequadas para a pavimentação.

Jiang e Wu (2019) analisaram 94 artigos, e observaram que apenas 18 artigos, correspondendo a 19,1% desse total, relataram o método de avaliação de impacto. Sendo assim, 17 artigos adotaram métodos de AICV *midpoint*, incluindo o ReCiPe (8 artigos), CML 2001 (4 artigos), TRACI (2 artigos) e 3 outros.

2.6.3 Ferramentas de *software* para ACV aplicada à pavimentos

No artigo de revisão elaborado pelos autores Aryan, Dikshit e Shinde (2023), foi constatado que os *softwares* mais utilizados em estudos de pavimentação são: SimaPro, o qual foi usado em 15% dos estudos, enquanto alguns estudos usaram GaBi (3%); PaLATE (3%); CHANGER (3%); Road-RES (2%); CO₂NSTRUCT (3%); e-CALC (2%) e OpenLCA (2%), e poucos outros *softwares* de ACV. Cerca de 9% dos estudos mencionaram o uso do Microsoft Excel/Planilha para cálculo de impacto ambiental, enquanto 50% dos estudos não utilizavam nenhum *software*, pois realizavam cálculos por meio de equações matemáticas.

2.6.4 Unidade Funcional aplicada a pavimentos

Segundo Inyim *et al.* (2016), a unidade funcional mais utilizada é o km (quilômetro) de via. Os autores avaliaram diversos artigos de pavimentação que utilizavam ACV, e verificaram que 12 artigos, dos 32 analisados (37,50%), adotaram como unidade funcional a quilometragem (km) construída, ou em milhas (*mi*). Outros estudos utilizaram comprimentos, tais como 5 km e 10 km, como unidade funcional, uma vez que os autores analisaram o projeto como um todo. Uma outra unidade funcional utilizada foi o metro quadrado (m²), quando se considerou o escopo da análise focado em materiais de superfície de pavimento.

Os autores Jiang e Wu (2019) avaliaram 94 artigos que abordavam a ACV da pavimentação rodoviária, e constatou-se que 12 artigos, dos 68 analisados (72,3%), adotaram como unidade funcional a extensão de via em quilômetros (km) ou em milhas (*mi*). Além disso, 11 artigos (11,7%) adotaram uma área de avaliação que considerava a superfície e a análise de degradação do pavimento, sendo, portanto, expressa em metros quadrados (m²).

Aryan, Dikshit e Shinde (2023) avaliaram 67 artigos que tratavam de pavimento flexível e rígido, sendo que 24 foram realizados nos EUA; 23 na União Europeia; 2 no

Canadá; 1 na Austrália e 17 na Ásia. De acordo com os pesquisadores, 54 dos 67 estudos adotaram o comprimento (em *km* ou *mi*) como unidade funcional, enquanto os demais estudos adotaram m^2 .

Liljenström, Björklund e Toller (2022) analisaram 84 artigos sobre infraestrutura rodoviária que tratavam em sua maioria sobre a comparação de diferentes materiais de construção. Os autores ressaltaram a importância de se definir a vida útil das infraestruturas, pois é um fator fundamental para a definição da unidade funcional da ACV, ou seja, a unidade pela qual serão comparados os impactos ambientais de diferentes alternativas de projeto ou de materiais. Desse modo, os pesquisadores verificaram que em 30% dos artigos avaliados, a vida útil era a mesma que a vida útil do projeto, ou seja, a duração de vida pretendida da infraestrutura.

2.6.5 Análise de sensibilidade e de incerteza

Segundo a ISO 14040 (ISO, 2009a), no estudo de ACV, a análise de sensibilidade estima os efeitos das escolhas feitas relativas ao método (AICV), ou dados sobre os resultados. A incerteza, por sua vez, se refere à imprecisão e à variabilidade dos dados de entrada e dos modelos utilizados na análise de inventário do Ciclo de Vida, podendo afetar os resultados finais. Deste modo, a análise de sensibilidade e de incerteza é considerada uma importante ferramenta para avaliar a confiabilidade dos resultados das ACV.

De acordo com Aryan, Dikshit e Shinde (2023), existem três tipos de incerteza para avaliar os resultados da ACV em pavimentação: (i) incerteza de parâmetro, (ii) incerteza de cenário e (iii) incerteza de modelo. A incerteza dos parâmetros é devida à incerteza nos parâmetros de entrada, enquanto a incerteza do cenário é devida a escolhas normativas incertas. A incerteza do modelo surge devido à incerteza no modelo matemático envolvido.

Aryan, Dikshit e Shinde (2023), dos 67 estudos, apenas 18 (27%) realizaram a análise de sensibilidade, enquanto apenas 6 (9%) estudos realizaram a análise de incerteza. Em relação à análise de sensibilidade, a maioria dos estudos avaliou as distâncias de transporte que exerceram um efeito significativo sobre o consumo de energia, bem como o método de mistura para a produção de asfalto; o volume de tráfego em termos de VMD; as frotas dos veículos; os impactos das atividades de construção

(taxas de emissão), dentre outros. Além disso, em relação à análise de incerteza, dos 6 estudos, 5 realizaram simulação de Monte Carlo. Os autores relatam que o número reduzido de estudos de ACV na área de pavimentação que contemplam a análise de sensibilidade e incerteza é devido às limitações metodológicas e de dados, ou pela falta de importância dada pelos profissionais de ACV.

Jiang e Wu (2019) avaliaram 94 artigos e, do total, 32 estudos (34,0%) realizaram uma análise de sensibilidade, e apenas 17 estudos (18,1%) realizaram uma análise de incerteza. Nos artigos avaliados pelos autores, apenas alguns cumpriram o requisito da ISO 14044 (2009b) de que a análise de sensibilidade é obrigatória, e de que a análise de incerteza deve complementar os resultados. Sendo assim, a baixa conscientização e a falta de sensibilidade e incerteza indicam insegurança sobre os resultados obtidos pelas publicações existentes.

2.7 Considerações finais

Pode-se afirmar, embora teoricamente esperado, que o *software* utilizado para análise afeta os resultados e possíveis comparações entre os estudos, mesmo que contenham os mesmos bancos de dados e métodos. Além disso, foi observado que a maioria dos estudos estimou os impactos sobre a mudança climática, deixando-se, em segundo plano, outros tipos de impactos. Deste modo, a prerrogativa desta pesquisa é apontar os impactos gerados por uma infraestrutura rodoviária, especialmente em relação às mudanças climáticas, a fim de se aumentar a conscientização e, por fim, fornecer informações que possam nortear os pesquisadores e responsáveis técnicos na tomada de decisões sustentáveis com relação ao meio ambiente.

Como apresentado, observa-se que já existem estudos que avaliam os impactos causados pelas infraestruturas dos pavimentos que utilizam a metodologia ACV. Desse modo, considerando a importância de ACV, este estudo pretende obter um modelo de análise de ciclo de vida contemplando as fases de extração, de produção de insumos e materiais, e da construção do ciclo de vida do pavimento. E ainda conforme explicitamos na literatura, a UF (unidade funcional) mais utilizada é o km (quilômetro) construído, a qual foi adotada nesta pesquisa.

De acordo com a literatura, quanto às ferramentas de apoio de ACV, observou-se que o *software* mais utilizado é o SimaPro, e os métodos foram os de AICV CML e

ReCiPe. Logo, para essa pesquisa adotou-se o *software* SimaPro como ferramenta de auxílio e o CML como o método de AICV. Considerando o contexto, é importante destacarmos que o banco de dados Ecoinvent tem contribuído significativamente para o aprimoramento do SimaPro, uma vez que fornece informações atualizadas e relevantes para a realidade brasileira. Com diversas atualizações disponíveis, o Ecoinvent contempla dados com composições que consideram as particularidades do cenário nacional, o que aumenta a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Ainda no que se refere às categorias de impacto avaliadas nos estudos de ACV de pavimentos, observou-se que o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente as emissões de carbono, são comumente adotados em trabalhos de pavimentação que visam a comparação dos materiais. Por isso, foram os impactos ambientais considerados neste estudo.

Em relação à análise de sensibilidade e incerteza de ACV aplicadas à pavimentação, consideramos ser uma ferramenta importante e recomendada em diretrizes e normas internacionais, como a ISO 14044 (ISO, 2009a). A análise de sensibilidade e incerteza é fundamental em um estudo de ACV de pavimentação, uma vez que permite avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos e a influência das diferentes variáveis nos resultados do estudo. Isso é importante porque a ACV é uma ferramenta complexa que envolve diversas variáveis e pressupostos, tornando os resultados incertos e sujeitos a variações.

A análise de sensibilidade ajuda a identificar quais são os parâmetros mais sensíveis e incertos, assim como suas magnitudes, o que auxilia a orientar pesquisas futuras e fornecer informações mais precisas e confiáveis aos tomadores de decisão. Com isso, é possível fazer escolhas mais bem fundamentadas em relação à seleção de materiais e processos construtivos que minimizem os impactos ambientais, e que possam garantir a sustentabilidade das obras de pavimentação. Deste modo, esta pesquisa abordará as análises de sensibilidade e de incerteza.

3. COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO

A análise de desempenhos mecânico e hidráulico de solos não saturados é denominada de comportamento hidromecânico. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o comportamento hidromecânico dos solos não saturados está atrelado às suas condições físicas, bem como da atmosfera. As variações no estado dos solos não saturados dependem, principalmente, das propriedades hidráulicas e da interação do solo superficial com a atmosfera. As condições atmosféricas respondem por constantes variações no conteúdo de água dos poros, influenciando o comportamento desses solos. Diante do exposto, tornam-se relevantes os estudos referentes ao comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados que incorporem as correlações entre as propriedades mecânicas e hidráulicas.

3.1 Considerações iniciais

Os solos de subleitos normalmente permanecem em uma condição não saturada, e estão sujeitos às influências do ambiente. Fatores ambientais contribuem para o regime de umidade e variações de sucção do solo (ψ) que, por sua vez, influencia a resistência e rigidez dos materiais. Vários estudos, nos últimos anos, demonstraram as fortes correlações entre as propriedades mecânicas, tais como o módulo de resiliência de solos não saturados e as propriedades hidráulicas como umidade e sucção (FREDLUND, MORGENSTERN e WIDGER, 1978; EDIL, MOTAN e TOHA, 1981; WU, GRAY e RICHART JR, 1984; ALONSO, GENS e JOSA, 1990; VANAPALLI *et al.*, 1996; DRUMM *et al.*, 1997; RODRIGUES, 1997; KHALILI, GEISER e BLIGHT, 2004; NG e YUNG, 2008; OH, VANAPALLI e PUPPALA, 2009; SAWANGSURIYA *et al.*, 2009a,b; SILVA, 2009; KHOSRAVI e MCCARTNEY, 2012; ALONSO *et al.*, 2013; OH e VANAPALLI, 2013; LU e KAYA, 2014; HOYOS *et al.*, 2015; FREITAS, REZENDE e GITARANA JR., 2020; VARGAS, 2020).

Segundo Han e Vanapalli (2017), o M_R é uma propriedade mecânica importante para interpretar e prever as deformações elásticas de solos de subleitos sob carga de tráfego intenso, e é um indicador realista de vida útil de pavimentos. Em pavimentos, no geral, os subleitos são dimensionados com a umidade ótima; porém, ao longo da sua vida útil, a plataforma fica exposta às intempéries, ocasionando a variação transiente da umidade nos solos não saturados. Em detrimento disso, o comportamento mecânico é

significativamente influenciado pela variação da sucção do solo. A sucção do solo é um estado de tensão básico que mede, implicitamente, o efeito das forças de interação da água do solo nas características de deformação dos materiais do pavimento (NG *et al.*, 2013; KHOURY e ZAMAN, 2004). Na literatura, encontramos diversas pesquisas que utilizam a sucção do solo como parâmetro fundamental na previsão da M_R (FREDLUND, BERGAN e WONG, 1977; KHOURY *et al.*, 2003; GUPTA *et al.*, 2007; HAN e VANAPALLI, 2016c; HAN, VANAPALLI e ZOU, 2017).

Somado a isto, tem-se que os solos tropicais podem apresentar comportamentos diferentes quando comparados com aqueles de clima temperado na presença de água. As normas para a seleção de solos brasileiros adequados para a utilização em obras de pavimentação são replicações das normas criadas para a escolha de solos de clima temperado, os quais são altamente excludentes para solos tropicais (CAMAPUM *et al.*, 2015; GUIMARÃES, MOTTA e CASTRO, 2019; LIMA *et al.*, 2020; LIMA, MOTTA e ARAGÃO, 2021). Além disso, é usual a construção de pavimentos carentes de sistema de drenagem dimensionado e executado de forma satisfatória (JAYAKUMAR e SOON, 2015). Por isto, consideramos interessante que sejam realizados novos estudos do comportamento da M_R e da sucção aplicados a solos tropicais.

3.2 Sucção

Segundo Fredlund (1996), os solos não saturados apresentam um comportamento singular, e não seguem os critérios adotados pela clássica Mecânica dos Solos. De acordo com Beneveli (2002), o parâmetro determinante para entendermos o comportamento desse tipo de solo é a sucção, uma vez que a resistência e a deformabilidade são fortemente influenciadas pela pressão negativa da água. Em outras palavras, a sucção é uma grandeza energética que avalia a capacidade do solo reter a água.

É comum que a água migre para dentro de um solo não saturado, e seja adsorvida ou retida por esse material. Na presença de água, os solos não saturados apresentam o comportamento denominado sucção, que é a diferença do estado de equilíbrio entre as pressões instaladas na água (internas) e as pressões instaladas no ar (forças externas). No geral, as pressões no ar são sempre superiores às exercidas na água. Por esse motivo, designa-se como pressões negativas aquelas que são inferiores às pressões atmosféricas, como são, justamente, as pressões que ocorrem na água. Desta feita, a sucção é a diferença

entre a pressão do ar e a pressão na água; ou seja, é a energia aplicada para a remoção da água no solo por unidade de volume d'água (LEE e WRAY, 1995; NEVES, 2016).

No início do século 20, os pesquisadores Fredlund e Rahardjo (1993) desenvolveram o conceito teórico de sucção do solo. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), e Neves (2016), a sucção matricial é resultante da combinação da capilaridade (macroestrutura) com as forças de adsorção (microestrutura). A sucção osmótica é caracterizada pela presença de íons na água, provocada por diferentes concentrações de sais dissolvidos na fase líquida. No caso de não haver variações das pressões externas e gravitacional, considera-se apenas o potencial denominado total (sucção total), representado pela equação 3.1.

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o = (u_a - u_w) + \psi_o \quad \text{(Equação 3.1)}$$

Em que:

ψ_t é a sucção total;

ψ_m é a sucção matricial;

ψ_o é a sucção osmótica;

u_a é a pressão intersticial do ar;

u_w é a pressão na água intersticial.

Neves (2016) destaca que os problemas envolvem a interação entre o solo e a atmosfera, e que geralmente só ocorrem variações da sucção matricial, pois são as que estão associadas à infiltração ou à evaporação d'água. No âmbito da pavimentação, raramente se alteram as concentrações dos minerais presentes no solo. Para tanto, poderemos assim afirmar que, na prática e no âmbito das infraestruturas de transportes, somente serão relevantes as variações da parcela matricial da sucção.

3.2.1 Curva característica do solo

A Curva Característica da Água do Solo (SWCC - *Soil-Water Characteristic Curve*) ou Curva de Retenção de Água do Solo é definida como a variação da capacidade de armazenamento de água dentro da macroporosidade e microporosidade do solo (SILVA, 2009; YAO *et al.*, 2018). Diversos pesquisadores desenvolveram estudos sobre como a sucção está relacionada com a saturação, e de que modo a forma como a SWCC é medida nos últimos anos (VAN GENUCHTEN, 1980; FREDLUND *et al.*, 1994;

SILVA, 2009; MAHABADI *et al.*, 2014; MAHABADI *et al.*, 2016; HAN e VANAPALLI, 2016c; MAHABADI, ZHENG e JANG, 2016; YAO *et al.*, 2018).

Segundo Fredlund *et al.* (1994), a curva característica é utilizada para estimar propriedades dos solos não saturados, e é descrita pela relação da sucção em função da umidade gravimétrica, do teor de umidade volumétrica ou do grau de saturação. Esta ferramenta poderá ser usada, ainda, para a análise de comportamentos mecânico e físico do solo, tais como a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e o seu Módulo de Resiliência; e permitirá, também, a obtenção de informações sobre a estrutura do solo, fazendo estimativas da condutividade hidráulica do solo não saturado (ou o coeficiente de permeabilidade) (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; FREDLUND, 1996; NEVES, 2016). A curva característica do solo é a relação entre a quantidade de água existente no solo e a sucção, e pode ser expressa pelas equações 3.2, 3.3 e 3.4 (NEVES, 2016):

$$\omega = \frac{W_{\omega}}{W_S} = \frac{S_r e}{G_S} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Em que:

ω é o teor de água gravimétrico;

W_{ω} é o peso da água;

W_S é o peso dos sólidos;

S_r é o grau de saturação;

e é o índice de vazios;

G_S é a densidade de uma partícula sólida.

$$\theta_{\omega} = \frac{V_{\omega}}{V} = \frac{S_r e}{1 + e} = S_r n \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Em que:

θ_{ω} é o teor de água volumétrico;

V_{ω} é o volume de água;

V é o volume total;

S_r é o grau de saturação;

e é o índice de vazios;

n é a porosidade.

$$S_r = \frac{V_\omega}{V_v} \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Em que:

S_r é o grau de saturação;

V_ω é o volume de água;

V_v é o volume de vazios.

Para Neves (2016), a vantagem de se definir a curva característica do solo em função do grau de saturação é que esta grandeza não depende diretamente do índice de vazios do solo. A relação entre ω e θ_ω é dada pela equação 3.5.

$$\theta_\omega = \frac{\omega G_S}{1 + e} \quad \text{(Equação 3.5)}$$

Em que:

θ_ω é o teor de água volumétrico;

ω é o teor de água gravimétrico;

G_S é a densidade de uma partícula sólida;

e é o índice de vazios.

Por fim, pode-se afirmar que a curva de retenção de água no solo é uma ferramenta essencial para a análise do comportamento hidromecânico de um solo não saturado, pois este procedimento facilita o entendimento das propriedades do solo, como as condutividades hidráulica e térmica (fluxo de água, ar e calor), bem como a resistência ao cisalhamento tanto quanto o módulo de resiliência (RODRIGUES, 1997; CASTRO, 2019).

3.2.2 Fatores que influenciam a curva característica dos solos não saturados

De acordo com Vargas (2020), a capacidade de retenção da água no solo depende de diversos fatores, tais como: distribuição do tamanho de poros (associado à distribuição da granulometria); umidade e método de compactação (estrutura); índice de vazios; tipo do solo; textura; mineralogia; histórico de tensões e grau de intemperismo. Na literatura, encontra-se diversos trabalhos que descrevem os fatores que influenciam a sucção, ou na forma como a curva se delinea com distintas características, as quais são apresentadas de forma resumida para alguns desses fatores.

- **Granulometria, tipo de solo e mineralogia:**

Os solos arenosos possuem mais facilidade em perder água retida em seus poros maiores devido ao tamanho dos grãos, e demandam baixos valores de sucção para ocorrer a dessaturação. Em contraparte, os solos finos ou argilosos apresentam alta capacidade de armazenamento de água, e exigem altos valores de sucção para ocorrer a diminuição do grau de saturação (VANAPALLI *et al.*, 1999; CASTRO, 2019).

O solo tem uma relação de sucção *versus* umidade característica, geralmente apresentada em forma sigmoïdal, desde que não alterado o arranjo poroso e a geometria do sistema. A retenção de água depende do tipo de solo, sendo mais acentuada nos solos mais finos que tendem a ter uma variação de sucção numa faixa mais ampla para variações volumétricas em comparação aos solos mais arenosos. A Figura 3.1 mostra três curvas de retenção típicas, apresentando a diferença entre os diversos tipos de solos existentes (arenoso, siltoso e argiloso), expressas em termos de umidade volumétrica e sucção.

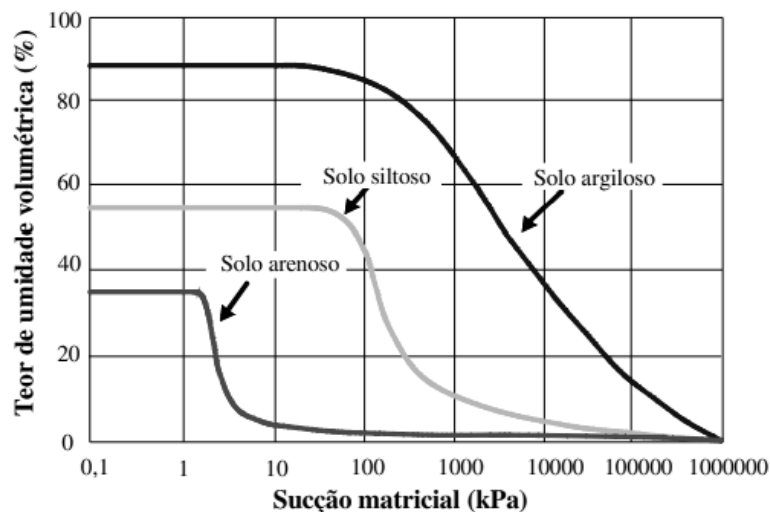


Figura 3.1 - Curva de retenção para diferentes tipos de solo.

Fonte: adaptado de Fredlund e Xing (1994).

- **O histórico de tensões, a umidade de compactação e a estrutura do solo:**

As tensões afetam fortemente a distribuição de tamanhos de poros e, conseqüentemente, a forma da curva característica, especialmente quando se tem valores de sucção baixos (EDIL e MOTAN, 1979; CERATTI *et al.*, 1996; VANAPALLI *et al.*, 1999; VARGAS, 2020). Segundo Rodrigues (1997), a quantidade de energia ou sucção requerida para remover água de um solo depende da tensão superficial entre as partículas

do mesmo e das moléculas de água, bem como do tamanho dos poros. Ainda de acordo com a autora, em situações em que a tensão superficial é constante, a sucção requerida para remover a água dependerá somente da estrutura do solo. Para Vargas (2020), é por este motivo que se considera a tensão superficial um dos fatores que apresentam maior influência na estrutura do solo. A Figura 3.2 apresenta o gráfico da influência estrutura do solo na sucção.

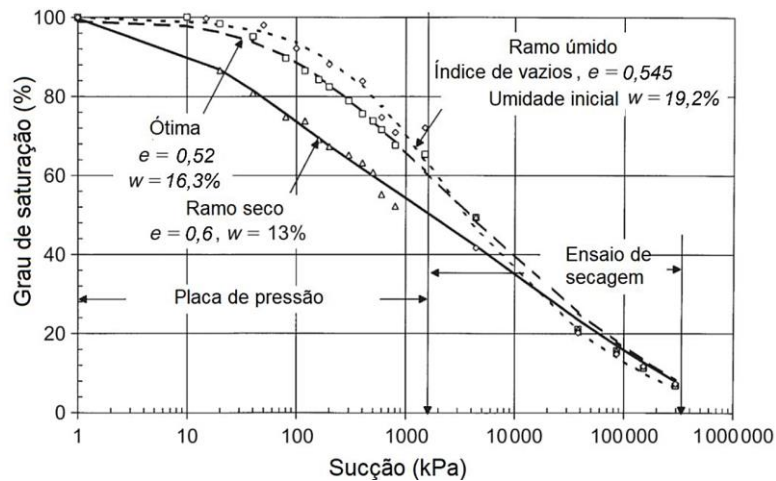


Figura 3.2 – Efeito da estrutura na sucção do solo.

Fonte: adaptado de Vanapalli (1999).

Em sua pesquisa Zhemchuzhnikov (2015) avaliou como a sucção e o teor de argila afetam as resistências à compressão e tração de corpos de prova compactados estaticamente sem confinamento. Os resultados mostraram uma tendência oposta à maioria dos estudos relevantes pois, com o aumento da sucção, a resistência caiu até atingir um valor mais ou menos constante. Esse comportamento pode ser explicado pela dessecação dos agregados de argila, que podem provocar fissuras e, conseqüentemente, reduzir a resistência do material.

- **Trajatória de umedecimento ou secagem:**

Geralmente é verificado experimentalmente que a curva característica de uma determinada mostra de solo é dependente da trajetória de secagem e umedecimento, provocadas pelo fenômeno da histerese; ou seja, para um mesmo valor de sucção, mais água ficará retida nos poros durante a secagem daquelas partículas d'água que foram absorvidas durante o umedecimento (RODRIGUES, 1997; LU e LIKOS, 2004, SILVA, 2009). A Figura 3.3 apresenta o gráfico da histerese.

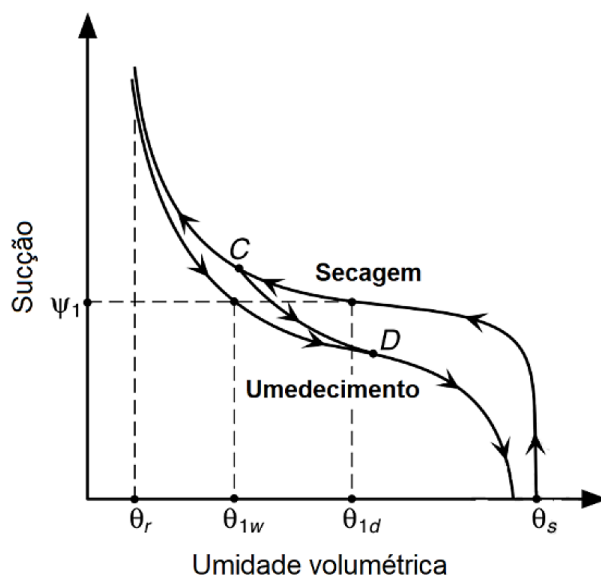


Figura 3.3 – Efeito da histerese de um solo não saturado.
 Fonte: adaptado de Lu e Likos (2004).

3.2.3 Modelos matemáticos para o ajuste da curva característica dos solos não saturados

A curva de retenção tem várias aplicações, tais como na caracterização do solo quanto às suas possibilidades de retenção de água; auxiliar em cálculos associados ao fluxo e armazenamento de água em solos e, ainda, de servir na previsão de propriedades de determinação experimental mais complexa, como a função de condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento (SILVA, 2005).

Para esses propósitos, é comum necessitar-se de uma descrição matemática. Para tal, diversos modelos têm sido propostos para representar a curva de retenção de água pelos solos. Alguns desses modelos são analíticos e, em geral, se apoiam na descrição do tamanho e distribuição de poros, enquanto outros são equações de ajuste estatístico (SILVA, 2005). A Tabela 3.1 sintetiza diversos modelos matemáticos que servem ao ajuste da curva de retenção.

Tabela 3.1 – Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (contínua).

Modelos	Equações	Parâmetros
Gardner ⁽¹⁾ (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + (q \cdot \psi)^n}$	Equação 3.6 q – parâmetro de ajuste; n – relacionado à inclinação do ponto de inflexão da curva.
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{s_b}{\psi}\right)^\lambda \quad \therefore \psi > s_b$ $\theta = 1 \quad \therefore \psi < s_b$	Equação 3.7 s_b – pressão de entrada de ar; λ – índice de distribuição de poros.

Tabela 3.1 – Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (continuação).

Modelos	Equações	Parâmetros
Van Genuchten (²) (1980)	$\Theta = [1 + (\alpha_V \psi)^n]^{-m}$	Equação 3.8 α_V – parâmetro de ajuste; m – parâmetro associado às condições residuais; n – parâmetro associado à drenagem de água para $\psi > s_b$.
Williams <i>et al.</i> (1983)	$\ln \Theta = a_1 + b_1 \ln \psi$	Equação 3.9 a_1 e b_1 – parâmetros de ajuste.
McKee e Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + A e^{(a\psi - B)}}$	Equação 3.10 A , a e B – parâmetros de ajuste.
Durner (³) (1992)	$\Theta = \sum_{i=1}^k w_i [1 + (\alpha_{V_i} \psi)^{n_i}]^{-m_i}$	Equação 3.11 k – número de modas na distribuição de poros; w_i – fator de ponderação para cada sub-curva - $\sum_{i=1}^k w_i$; α_{V_i} , n_i e m_i – parâmetros de Van Genuchten para cada sub-curva.
Kosugi (⁴) (1994)	$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_\psi - \theta_r}$ $= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma\sqrt{2}} \right]$	Equação 3.12 erfc – função erro complementar; $\ln(\psi_m)$ e σ – média e desvio padrão da função $\ln(\psi)$.
Fredlund e Xing (1994)	$\Theta = C(\psi) \theta_s \left\{ \frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right\}^m$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln[1 + (\psi/\psi_r)]}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]}$	Equação 3.13 a – parâmetro de ajuste; m – parâmetro associado às condições residuais; n – parâmetro associado à drenagem de água (inclinação da curva) para $\psi > s_b$.
Groenevelt e Grant (2004)	$\Theta = 1 - e^{-\left(\frac{k}{\psi}\right)^r}$	Equação 3.14 k e r – parâmetros de ajuste.
Gitirana Jr. e Fredlund (⁵) (2004)	$Se = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b1} \psi_{r1}})^{d_1}} +$ $+ \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{r1} \psi_{b2}})^{d_2}} +$ $+ \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_{b2} \psi_{r2}})^{d_3}} + S_4$	Equação 3.15 ψ_{bi} – sucções de entrada de ar dos diferentes trechos da curva; ψ_{ri} – sucções residuais; S_i – graus de saturação; d_i – fatores de ponderação.

Tabela 3.1 – Exemplos de modelos matemáticos de curvas de retenção (continuação).

Modelos	Equações	Parâmetros
Carducci <i>et al.</i> (2011)	$\Theta = \theta_r + \frac{\theta_p - \theta_r}{[1 + (\alpha_t \psi)^{n_t}]^{m_t}} + \frac{\theta_s - \theta_p}{[1 + (\alpha_e \psi)^{n_e}]^{m_e}}$	<p>Equação 3.16</p> <p>θ_p – umidade no platô assintótico intermediário da curva; α_t e α_e – parâmetros que conferem dupla porosidade, um da estrutura do solo e outro da textura do solo, respectivamente; n_t, m_t, n_e e m_e – parâmetros de ajuste de curvatura.</p>

Fonte: adaptado de Obiero *et al.* (2014), Leong e Rahardjo (1997) e Sírio, Barbassa e Zuquette (2020).

Nota: ⁽¹⁾ $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_\psi - \theta_r)$ - umidade volumétrica normalizada, equivalente ao grau de saturação efetiva, Se .

⁽²⁾ O parâmetro m de van Genuchten é comumente assumido como função do parâmetro n : $m = (1 - 1/n)$ (Mualem) ou $m = (1 - 2/n)$ (Burdine).

⁽³⁾ Equações desenvolvidas para solos com distribuição multimodal de poros e consiste na junção de várias curvas de van Genuchten ajustadas para cada trecho relacionado a uma moda. Expressões análogas podem ser pensadas utilizando outras curvas unimodais.

⁽⁴⁾ Equação desenvolvida a partir da consideração de que a distribuição de poros segue uma função lognormal. Nessa equação, $Se = Se(\ln s)$.

⁽⁵⁾ Equações desenvolvidas para solos com distribuição de poros bimodal.

3.2.4 Métodos de medida e controle de sucção

As curvas de retenção de água no solo podem ser obtidas experimentalmente de várias formas com medições tanto em campo, quanto em laboratórios, e com o foco na medida da sucção matricial. De acordo com Castro (2019), os métodos de medição da sucção são realizados com base na medição da resistência à tração da água nos poros. Entretanto, os métodos indiretos são aqueles realizados com base na determinação de parâmetros, como a umidade relativa e as condutividades elétrica e hidráulica, os quais são relacionados com a sucção através de equações de calibração. A Tabela 3.2, resume alguns métodos existentes de medida de controle de sucção, tanto com relação à medição de sua componente de sucção, quanto ao tempo de aquisição ou sensibilidade ao equilíbrio com o solo.

Segundo Rodrigues (1997), a verificação e escolha de tais métodos dependem de quatro fatores: precisão, custo, complexidade de procedimento e o tempo para realização dos ensaios. As técnicas da câmara de pressão de Richards e papel filtro são consideradas rotineiras para a obtenção da curva característica a partir de ensaios de laboratório (CASTRO, 2019). Desse modo, existem inúmeros métodos de medição de sucção, e para

o desenvolvimento desta pesquisa será utilizado o extrator de Richards ou Câmara de pressão de Richards.

Tabela 3.2 - Técnicas para medição de sucção em solos.

Técnica	Medida de Sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de equilíbrio
Bloco poroso de gesso (gypsum block)	matricial	30 a 3.000	semanas
Câmara de Pressão de Richards	matricial	0 a 1.500	horas
Hyprop	matricial	0 a 3.000	horas
Papel filtro (com contato)	total	30 a 30.000	7 dias
Papel filtro (sem contato)	matricial	400 a 30.000	7 – 14 dias
Placa de sucção	matricial	0 a 90	horas
Psicrômetro	matricial	100 a 71.000	minutos
Sensor de condutividade térmica	matricial	0 a 300	semanas
Tensiômetro osmótico	matricial	0 a 1.500	horas
Tensiômetro padrão	matricial	0 a 100	minutos
Tensiômetro tipo imperial College	matricial	0 a 1.800	minutos
WP4-C	matricial	3.000 a 6.500	dias

Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993), Ridley e Wray (1995), Marinho (1997), Lopes (2017), Menezes (2018) e Castro (2019).

3.3 Módulo de resiliência

Na mecânica dos pavimentos, as análises são realizadas a partir da teoria da elasticidade, e considera-se a estrutura do pavimento como um sistema de multicamadas (BURMISTER, 1943). O comportamento de tensão (σ) – deformação (ϵ) é representado através do módulo de resiliência (M_R). Desse modo, o M_R tem como objetivo a reprodução das condições de carregamento reais impostas aos solos, e quando submetidos às cargas de tráfego na estrutura do pavimento.

Em 1951, Francis Hveem definiu o termo “deformação resiliente”, ao invés de “deformação elástica” sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos (MEDINA e MOTTA, 2015). As deformações resilientes são deformações elásticas que possuem a capacidade de absorver a energia quando deformadas elasticamente. Então, após o descarregamento, a sua energia é recuperada. Entretanto, as deformações resilientes se diferem quanto ao tipo de aplicação de cargas.

De acordo com Medina e Motta (2015) e Franco (2007), a teoria da elasticidade classifica os materiais em dois comportamentos mecânicos de tensão-deformação: comportamento elástico linear, onde o módulo de resiliência não apresenta variação ao longo de toda espessura da camada constituída, e o comportamento elástico não linear, onde o módulo de resiliência pode variar ao longo da espessura da camada, sendo dependente da variação do estado de tensões a que está submetido.

A simulação das tensões de carregamento, deformação e deslocamento pode ser realizada em laboratórios, utilizando-se o equipamento denominado de triaxial de cargas repetidas, o qual relaciona a tensão vertical desviadora e a deformação resiliente. Logo, a Figura 3.4 ilustra as deformações de uma amostra qualquer de solo (corpo de prova) submetido a um carregamento cíclico no ensaio triaxial. A tensão desvio (σ_d), aplicada no ensaio triaxial de cargas repetidas, faz com que o corpo de prova seja submetido a uma tensão de compressão vertical (σ_1), e a uma tensão de compressão horizontal de confinamento (σ_3). Após a amostra sofrer sucessivos carregamentos e descarregamentos, observa-se as deformações.

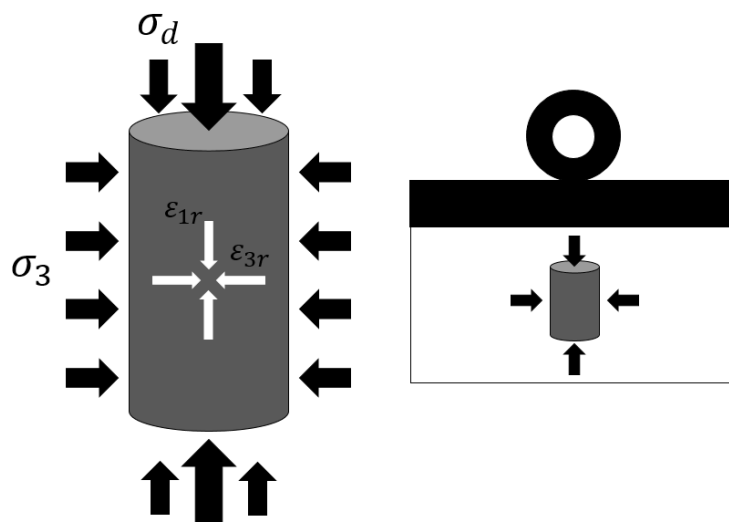


Figura 3.4 – Esquema de aplicação de tensão desvio aplicada repetidamente em uma amostra de solo qualquer e a sua correspondente deformação vertical resiliente.

Após atingir a tensão máxima em um dado ciclo, de acordo com Han e Vanapalli (2016a) e Zhang *et al.* (2018), apenas parte da deformação é recuperada após a descarga. Essa parte recuperada é a deformação elástica ou reversível (ϵ_r). A parcela não recuperada, e acumulada em cada aplicação de carga, é denominada de deformação plástica ou permanente (ϵ_p). A tensão desvio cíclica (σ_d) é aplicada repetidamente, e é

determinada em função da velocidade dos veículos e da profundidade do pavimento onde se deseja calcular o módulo resiliente. A frequência de aplicação da carga é função das condições de tráfego da estrada. Em seguida, a Figura 3.5 apresenta as deformações elásticas e plásticas para ciclos de carga e descarga de um solo submetido ao ensaio do triaxial cíclico.

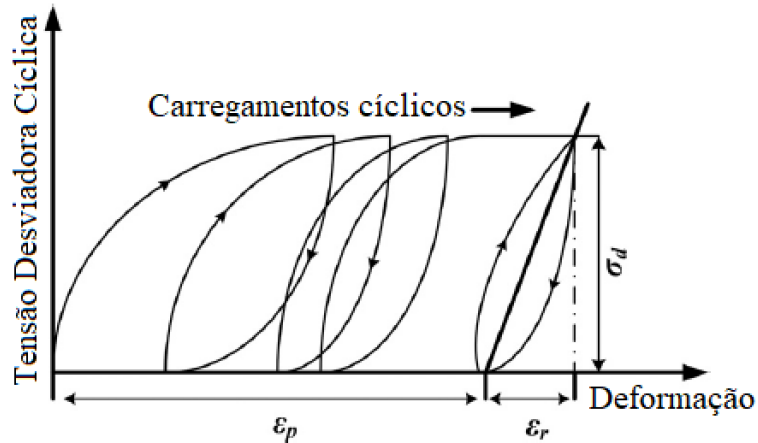


Figura 3.5 – Deformação do corpo de prova submetido ao carregamento cíclico (adaptado de Han e Vanapalli, 2016a).

Segundo Guimarães (2009), uma restrição feita para o equipamento triaxial dinâmico, ou de cargas repetidas, se refere à sua impossibilidade de simular a rotação das tensões principais que ocorre em um elemento de solo submetido à ação da carga de roda em movimento, bem como pela indução de tensões cisalhantes.

Segundo o DNIT (2006), o módulo de deformação resiliente pode ser determinado pela seguinte equação 3.17:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{(Equação 3.17)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

σ_d é a tensão desvio aplicada repetidamente ($\sigma_1 - \sigma_3$) [MPa];

ε_r é a deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetição da tensão desvio [mm/mm].

Medina e Motta (2015) ressaltam que, para cada solo, o M_R pode ser expresso como uma função dos estados das tensões aplicados durante o ensaio. Os modelos em

função das tensões e deformações mais comuns, utilizados no meio acadêmico brasileiro para a obtenção dos módulos resilientes, estão apresentados na Tabela 3.3, sendo que Hicks (1970), e Barksdale e Hicks (1973) foram os pioneiros ao proporem modelos matemáticos para obtenção do M_R .

Tabela 3.3 - Modelos de Módulo Resiliente obtidos na literatura.

Referência	Modelo	Equação
Seed <i>et al.</i> (1967a)	$M_R = k_1 \theta^{k_4}$	Equação 3.18
Hicks (1970) e Barksdale e Hicks (1973)	${}^a M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Equação 3.19
	${}^b M_R = k_2 + k_3 (k_1 - \sigma_d)$ para $k_1 > \sigma_d$	Equação 3.20
	${}^b M_R = k_2 + k_4 (k_1 - \sigma_d)$ para $k_1 < \sigma_d$	Equação 3.21
Allen e Thompson (1974)	$M_R = k_1 \theta^{k_2}$	Equação 3.22
Svenson (1980)	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$	Equação 3.23
May e Witczak (1981)	$M_R = k_3 \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_4} \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_5}$	Equação 3.24
Witczak e Uzan (1988)	$M_R = k_1 \theta^{k_2} \tau_{oct}^{k_3}$	Equação 3.25
Farrar e Turner (1991)	${}^c M_R = 30280 - 359 S - 325 \sigma_d + 237 \sigma_c + 86 PI + 107 S_{200}$	Equação 3.26
Macêdo (1996)	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Equação 3.27
Lee <i>et al.</i> (1997)	${}^c M_R = a S_{u1\%}$	Equação 3.28
Parreira <i>et al.</i> (1998)	$M_R = 4,5231 E_0^{0,3158} \sigma_d^{-0,3436} \theta^{0,4393}$ ${}^d M_R = 0,8481 E_0^{0,4559} + 1,1472 \theta^{0,8630}$	Equação 3.29
ARA (2004) - MEPDG	$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3}$	Equação 3.30
Franco (2007)	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \theta^{k_4}$	Equação 3.31

Nota: ^aSolos granulares; ^bSolos de comportamento coesivo; M_R : Módulo resiliente em MPa; ^c M_R : Módulo resiliente em *psi*; θ : invariante de tensões; σ_3 : tensão de confinamento; σ_d : tensão desvio; P_a : pressão atmosférica; τ_{oct} : tensão octaedra; σ_c : tensão de compressão; S : grau de saturação do solo; PI : índice de plasticidade; S_{200} : percentual passante na peneira #200; a : constante em função da tensão desvio; $S_{u1\%}$: tensão correspondente à 1% e deformação axial no ensaio de compressão simples; E_0 : módulo tangente inicial; ^dSolos classificados como arenosos; k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 : constantes obtidas por regressão linear.

O módulo de resiliência vem sendo utilizado nas análises mecânicas, pois representa melhor o comportamento da estrutura dos pavimentos. Portanto, para a

realização de análises estruturais de pavimentos mais precisas a partir do M_R , faz-se necessário verificar quais são os modelos mais apropriados para representarem o comportamento resiliente.

Apresenta-se, a seguir, uma descrição resumida dos principais fatores que afetam o comportamento do módulo resiliente dos solos.

3.3.1 Fatores que influenciam o módulo de resiliência

De acordo com estudos Seed *et al.* (1967b), Medina e Preussler (1980), Svenson (1980), Preussler (1983), Li e Seling (1994), Medina (1997) e Lekarp *et al.* (2000) os seguintes fatores podem afetar o comportamento resiliente dos solos: intensidade das tensões aplicadas; razão entre as tensões principais; número de repetições da tensão desvio; histórico de tensões; duração e frequência da aplicação da tensão desvio; natureza do solo (constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina); porcentagem de material passante na peneira nº 200; densidade e umidade de compactação; grau de saturação; método de compactação, dentre outros.

Portanto, ressalta-se a importância de se avaliar e compreender os fatores e efeitos que influenciam o módulo resiliente e, por isso, será apresentado abaixo uma breve revisão de alguns destes fatores.

- **Influência das tensões**

O DNIT (2006) ressalta que, nos solos classificados como finos e coesivos, o M_R depende da tensão desvio, pois é pouco atingido pela tensão confinante. Entretanto, nos solos classificados como granulares, o M_R depende da tensão confinante, pois é pouco afetado pela tensão desvio.

- **Influência do número de repetições da tensão desvio**

De acordo com Seed *et al.* (1962), Ceratti *et al.* (1996), Ooi *et al.* (2006) e Malla e Joshi (2006), a intensidade da tensão desvio aplicada em amostras de solo influi nas deformações elásticas. Para baixos níveis de tensão, o módulo de resiliência decresce rapidamente com o aumento da tensão desvio.

Segundo Rodrigues (1997), em cada aplicação da tensão desvio, em solos considerados não saturados, poderá ocorrer um acréscimo ou decréscimo do poro pressão

d'água. Estas variações ocorrem devido às condições do material e dos valores das tensões aplicadas. Os pesquisadores Edil e Motan (1979) e Rodrigues (1997) observaram que o incremento de sucção, que afeta o poro pressão do solo, provoca aumento no valor de M_R até atingir um máximo, e a partir deste valor o M_R decresce ou permanece constante para qualquer nível de tensão desvio.

- **Influência da duração e frequência do carregamento**

O tempo de atuação do carregamento é estabelecido em função da velocidade dos veículos e do ponto da camada ou estrutura do pavimento onde se deseja calcular o M_R (RODRIGUES, 1997; VARGAS, 2020). A frequência de aplicação é em função das condições de tráfego da estrada, e o efeito do carregamento depende do intervalo de aplicação das cargas (RODRIGUES, 1997).

- **Influência do grau de compactação**

Para o DNIT (2006), as condições de compactação de solos finos coesivos exercem grande influência no M_R , sobretudo na deformação recuperável sob determinada tensão desvio. O M_R diminui muito com o aumento da umidade de compactação. Os materiais granulares com massas específicas elevadas expressam altos valores de M_R (RADA e WITZAK, 1981). De acordo com Svenson (1980), Rada e Witzak (1981) e Vargas (2020), o M_R aumenta com o acréscimo do peso específico aparente seco. Sendo assim, é necessário conhecer o limite de variação do grau de compactação nas camadas do pavimento, a fim de se obter um peso específico aparente seco mais elevado, e consequentemente um M_R maior.

- **Influência da natureza do material**

O solo é um material que ocorre na natureza nas mais diferentes formas e composições mineralógicas, e que possui diversas características e comportamento mecânicos. Somado a isso, há outros fatores que afetam as estruturas interna do solo, como os gradientes de temperatura, a água (saturação), as cargas (tensão e deformação), etc.

Raad *et al.* (1992) compararam materiais bem graduados e mal graduados, em condições saturadas e não saturadas, usando ensaios triaxiais de cargas repetidas, e verificaram a influência da porcentagem de materiais finos em relação ao comportamento

dinâmico. Por fim, os autores concluíram que os agregados bem graduados apresentaram maior valor de M_R , enquanto aqueles com graduações baixas apresentaram diminuição dos valores de M_R .

Kalisoja (1997) *apud* Marmitt (2002) variou o tamanho dos grãos das amostras em suas pesquisas, e verificou que isto influenciava no valor do M_R pois, quanto maior os grãos dos materiais, maior era o M_R . Esse comportamento ocorre devido às ações das cargas externas que são transmitidas internamente através dos grãos mais grossos das bases granulares, resultando, assim, em bases com menor deformação e alta rigidez do material.

Kamal *et al.* (1993) e Tian *et al.* (1998) verificaram que o M_R de matérias granulares (pedregulho ou areia) geralmente diminui com o aumento da porcentagem de finos (siltes ou argilas).

Elliot e Thornton (1988) relatam que a maioria dos solos finos exibem um decréscimo no módulo de resiliência quando a umidade aumenta, acarretando um aumento das deflexões do subleito, comprometendo a vida útil do pavimento.

- **Influência do grau de saturação**

A influência da umidade no M_R é determinada pelo aumento do grau de saturação que provoca redução no valor do M_R (LI e SELIG, 1994). Para Vargas (2020), o grau de saturação do solo depende do clima da região, do equilíbrio entre a precipitação local e a evapotranspiração, bem como das condições de drenagem e da permeabilidade do solo. De acordo com Li e Selig (1994), quanto menor o grau de saturação maior será o valor do M_R para as condições de mesma tensão confinante, e diferentes valores de peso específico.

Em geral, o desafio para a comunidade acadêmica se impõe pela dedicação ao investigar o processo de saturação dos subleitos e os efeitos no M_R a partir da variação do teor de umidade e sucção. Assim, o dimensionamento do pavimento depende de previsões mais precisas do M_R , a fim de que se possa gerar resultados que descrevem o comportamento mais próximo da realidade.

3.3.2 Módulo de resiliência em condição não saturada

Uma série de pesquisas vem sendo desenvolvida no sentido de se avaliar a influência do módulo resiliente nos solos saturados, ou seja, a influência da variação de umidade ou sucção no módulo resiliente, constituindo-se, assim, os estudos da mecânica dos estados críticos dos solos não saturados.

Segundo Vargas (2020), devido às diversas variações das condições meteorológicas durante o ano, grandes alterações nos teores de umidade dos solos poderão ser provocadas dependendo do acesso da água à camada e, portanto, no seu Módulo de Resiliência ao longo da vida útil do pavimento. De acordo com Motta (1991), a água afeta todas as obras que envolvem fundação e, em particular, os pavimentos, seja pela chuva ou pelo lençol freático. O pesquisador conclui que a precipitação age aumentando a umidade nas camadas inferiores do pavimento, significando uma variação no comportamento resiliente.

Inúmeros autores, entre eles Hicks (1970), Hicks e Monismith (1971), Jones e Witczak (1977), Sweere (1990), Motta (1991), Raad, Minassian e Gartin (1992), Li e Selig (1994), Dawson *et al.* (1996), Hornych *et al.* (1998), Tian *et al.* (1998), Ksaibati *et al.* (2000), Kolisoja *et al.* (2002), Yang *et al.* (2005), Liang *et al.* (2008), Silva (2009), Vargas (2020) e Kern *et al.* (2021), constataram, em geral, a conseqüente redução do módulo resiliente pelo aumento do teor de umidade, o que consiste no aumento do grau de saturação. A intensidade destas variações depende do valor das tensões confinantes utilizadas nos ensaios, e do material em si.

De acordo com Ceratti *et al.* (2004), o módulo resiliente é sensível ao estado de tensão no interior dos subleitos, e a sucção controla o estado de tensões em solos não saturados. Diversos autores, entre eles Gehling *et al.* (1998), Naji *et al.* (2003) *apud* Silva (2009), Yang *et al.* (2005), Ceratti *et al.* (2004), Rodrigues (2007) e Cary e Zapata (2011) evidenciaram a influência da variação de umidade e da sucção no módulo resiliente, e concluíram que o acréscimo da umidade resulta na redução da sucção nos subleitos e, conseqüentemente, na redução do M_R .

Segundo estes autores, os materiais granulares não saturados desenvolvem excesso de poro-pressão em condições de cargas repetidas, reduzindo o valor do módulo

de resiliência. Diante disso, as tensões efetivas no material também diminuem com uma consequente redução na resistência ao cisalhamento e na rigidez do material.

Svenson (1980) é pioneira no Brasil no que se refere ao estudo do efeito do teor de umidade no comportamento resiliente. Em seu trabalho, apresenta resultados obtidos pela compactação por impacto e por amassamento, relacionando-se ao MR, tendo ensaiado amostras não saturadas, de solo argiloso, provenientes de subleitos, e camadas de reforço de rodovias no Rio de Janeiro. De acordo com a autora, o efeito da umidade de compactação é bastante significativo na relação entre o módulo resiliente e a intensidade da tensão desvio. E para valores de umidade elevados, o módulo resiliente quase não varia com o acréscimo da tensão desvio.

Jones e Witczak (1977) utilizaram solos classificados, como argila siltosa, aplicados ao subleito, e provenientes de várias seções de uma rodovia experimental construída em San Diego, nos EUA, na década de 1960. Os autores observaram que, ao se aumentar o teor de umidade de compactação deste material de 11% para aproximadamente 20%, houve decréscimo do módulo de resiliência, variando de 275 Mpa para próximo de 52 Mpa.

Raad, Minassian e Gartin (1992) compararam materiais bem graduados, onde havia, em grande quantidade, a presença de finos com materiais uniformemente graduados em condições saturadas e não saturadas, e concluíram que o material granular saturado, submetido à repetição de cargas, desenvolveu excesso de poro-pressão, contribuindo na redução do valor do módulo de resiliência. Os autores avaliaram que o dano causado pela repetição de carga em materiais não saturados, e bem graduados, pode ser muito maior do que nos compostos de materiais mal graduados.

Ceratti *et al.* (1996) concluíram que um pequeno incremento na umidade de moldagem dos corpos-de-prova provoca uma diminuição no módulo de resiliência, independentemente do nível de tensão desvio, e que os valores de módulo decrescem à medida que se aumenta o nível de tensão desvio aplicado.

Dawson *et al.* (1996) estudaram o comportamento de materiais granulares em altos níveis de saturação, reportando uma notável dependência do módulo de resiliência com o teor de umidade. O autor verificou que, à medida que se aumenta a saturação das amostras, o valor do M_R tende a diminuir.

Gehling *et al.* (1998) estudaram a influência da sucção no módulo resiliente de quatro solos típicos de subleito do Rio Grande do Sul. Os solos eram inicialmente compactados na umidade ótima e submetidos a trajetórias de secagem ou umedecimento. Os autores verificaram que o módulo resiliente é crescente com a sucção até determinado valor de sucção, a partir do qual o módulo resiliente decresce abruptamente, ou permanece quase constante.

Werk (2000) verificou que o efeito da umidade sobre o M_R é mais significativo em agregados de maior graduação com a presença maior de finos, e isto devido à permanência da água nos poros. Entretanto, observou-se o oposto em materiais uniformes onde a perda de água é considerada mais rápida.

Silva (2003) desenvolve seu estudo a partir de dois solos de subleito no município de Sinop, no estado do Mato Grosso. Em seu trabalho, o autor apresenta gráficos da variação do M_R apenas com a tensão desvio, e relata uma redução dos valores de M_R com o aumento da umidade por saturação dos corpos de prova. De acordo com Silva (2003), avaliar M_R apenas com a tensão desvio pode acarretar uma conclusão errônea em relação ao crescimento do M_R com o aumento da tensão desvio.

Salem *et al.* (2003) estudaram subleitos de sete regiões dos EUA, dividindo-se em dois grupos de análises: solos plásticos e solos não plásticos. Os autores observaram a tendência de diminuição do M_R do subleito com o aumento da umidade dos solos. Esta pesquisa contribuiu com a elaboração do Guia de Projeto da AASHTO – Associação Norte-Americana de Funcionários do Transporte e das Rodovias Estaduais (tradução nossa), em inglês *American Association of State Highway and Transportation Officials* no desenvolvimento do modelo que estima a variação do módulo de resiliência devido às variações do grau de saturação.

Naji *et al.* (2003) *apud* Silva (2009) mostraram que o módulo de resiliência aumenta com o acréscimo da sucção matricial. Eles atribuem esse fenômeno ao fato de que maiores sucções produzem um endurecimento da amostra, e também maior integridade da estrutura do solo, conseqüentemente produzindo maior módulo de resiliência.

Yang *et al.* (2005) verificaram que, nos solos com baixo teor de umidade, a sucção matricial tende a ser tão alta que o módulo resiliente é dominado pela sucção matricial.

Os pesquisadores ressaltam o efeito da tensão desvio no módulo de resiliência para solos com alta teor de umidade, e concluem que é importante avaliar o comportamento da sucção.

Ceratti *et al.* (2004) analisaram a influência da sucção no módulo de resiliência de solos lateríticos, os quais foram submetidos ao processo de ciclo de secagem e umedecimento. Deste modo, verificaram que o módulo de resiliência do solo, compactado na umidade ótima, pode ser reduzido em até quatro vezes pelos ciclos de umedecimento e secagem. Os autores destacaram a importância do projeto de drenagem e manutenção em pavimentos pois, uma vez bem drenados, os solos do subleito tendem a não saturar por longos períodos.

Rodrigues (2007) estudou a influência da umidade e da sucção nos valores de M_R de solos lateríticos de subleitos no Rio Grande do Sul. A autora realizou ensaios de sucção com amostras do triaxial cíclico que apresentam redução nos valores obtidos, comparado aos valores de sucção em corpos de prova antes do ensaio do triaxial cíclico. Ela resalta que o ensaio é não drenado, e que por isso ocorre a redução do índice de vazios e o aumento do grau de saturação, ocasionando, ao final, a redução da sucção. Ainda segundo essa mesma autora, o incremento na sucção provoca o aumento no valor do módulo resiliente até atingir um máximo. A partir deste patamar, o valor do módulo de resiliência decresce, ou permanece constante para qualquer nível de tensão desvio. O valor máximo do módulo de resiliência com a sucção difere para cada tipo de solo. As amostras de solos submetidas ao ciclo de secagem e umedecimento apresentaram valores de M_R em 68% menor do que as amostras compactadas e ensaiadas na umidade ótima, cuja redução foi superior ao M_R obtido nas amostras apenas submetidas à umidificação.

Cary e Zapata (2011) estudaram o comportamento da variação da sucção, ou seja, da pressão da água em solos não saturados e saturados, e observaram o efeito das mudanças sazonais no módulo de resiliência. De acordo com os autores, a sucção deve ser considerada como uma variável independente do estado de tensão na determinação do módulo de resiliência. Os pesquisadores ressaltam que o teste de módulo de resiliência em materiais não saturados requer condições particulares tanto para os procedimentos de carregamento quanto para o equipamento de teste. Segundo Cary e Zapata (2011), medir a sucção e sua variação, sob carga dinâmica aplicada, ainda é uma tarefa desafiadora, tendo-se em vista que a capacidade de medir um módulo resiliente de estado de tensão

total é atualmente viável apenas para instituições de pesquisas, ou por meio de grandes empresas no ramo de pavimentação. No entanto, os autores acreditam que na medida em que esses recursos de testes são implementados no estado da prática, e um banco de dados é desenvolvido, o modelo de estado de tensão completo é uma forma contundente para prever a resposta do módulo resiliente.

Zhang *et al.* (2018) constataram que o M_R é dependente da tensão octaédrica oriunda da pressão de confinamento do nível de compactação, e da própria sucção matricial. Ainda de acordo com o autor, o M_R diminui com o aumento da tensão octaédrica devido à não linearidade da relação tensão/deformação do solo. Além disso, ele observou que o M_R aumenta significativamente com o aumento da pressão de confinamento e do nível de compactação. Por outro lado, em sua pesquisa foi demonstrado que o M_R teve uma tendência de aumento com a diminuição da sucção matricial. Para Zhang *et al.* (2018), tal comportamento foi devido à sucção matricial que induz a uma força normal adicional, fazendo com que as amostras de solo fiquem mais rígidas.

Vargas (2020) observou que o teor de umidade dos materiais granulares, decorrente da posição do nível do lençol freático (uma das principais variáveis associada às condições climáticas), afeta os valores do M_R e da deflexão superficial, das deformações horizontais e das deformações verticais em pontos críticos da estrutura do pavimento.

Kern *et al.* (2021) analisaram a influência da variação do teor de umidade nos materiais que compõem o pavimento, e avaliaram o desempenho da estrutura. Segundo os autores, essa variação na umidade pode ser causada por drenagem ineficiente, oscilação do lençol freático e infiltrações, os quais afetam a resistência e aumentam a deformabilidade do material. Os pesquisadores utilizaram o equipamento triaxial de carga repetida para a realização dos testes do Módulo de Resiliência, variando o teor de umidade dos corpos-de-prova em $\pm 2\%$ em relação à umidade ótima. Eles notaram que houve uma diminuição de 70% no M_R comparando-se as amostras acima da umidade ótima. Por fim, concluíram que os modelos clássicos que não incorporam os parâmetros relacionados ao teor de umidade apresentaram desempenho relativamente ruim com relação ao solo que foi analisado sob condições de teor de umidade variável. Eles também verificaram que o

modelo que incorpora parâmetros, como, por exemplo, o teor de umidade, apresentara desempenho superior.

Os modelos que são desenvolvidos, principalmente, a partir do ajuste da curva do triaxial de laboratório não levam em consideração, em sua maioria, os efeitos da umidade e sua variação sazonal. A NCHRP - *National Cooperative Highway Research Program* (Programa de Pesquisas sobre Rodovias da Cooperativa Nacional Norte-Americana – tradução nossa) desenvolveu uma equação para prever mudanças no módulo de resiliência em relação ao teor de umidade. Esse modelo de previsão é um dos mais utilizados, e é chamado de Modelo Universal (equação 3.32), o qual é utilizado no MEPDG - *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (Guia de Projeto Mecanístico-Empírico de Pavimentos – tradução nossa) (ARA, 2004). Neste modelo, o M_R é estimado na umidade ótima, e leva em consideração as influências das tensões aplicadas que, por fim, é adequado para uma grande variedade de materiais de pavimentação (BA *et al.*, 2013; SALOUR e ERLINGSSON, 2015; HAN e VANAPALLI, 2016a).

$$\log\left(\frac{M_R}{M_{ROPT}}\right) = a + \frac{b - a}{1 + \exp\left[\ln\left(-\frac{b}{a}\right) + k_m (S - S_{OPT})\right]} \quad \text{(Equação 3.32)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência para qualquer grau de saturação [MPa];

M_{ROPT} é o módulo de resiliência na condição de teor de umidade ótimo [MPa];

a é o mínimo de $\log\left(\frac{M_R}{M_{ROPT}}\right)$;

b é o máximo de $\log\left(\frac{M_R}{M_{ROPT}}\right)$;

k_m é o parâmetro de regressão do modelo;

S é o grau de saturação do solo;

S_{OPT} é o grau de saturação no teor ótimo de umidade;

$(S - S_{OPT})$ é a variação do grau de saturação expresso em decimal.

Na literatura, observa-se diversos modelos que tratam do efeito da umidade no M_R , os quais não serão apresentados aqui, neste estudo. Porém, será analisado os efeitos das variações da umidade sobre o M_R , uma vez que afetam os princípios que governam a mecânica dos solos não saturados e a relação entre as poro-pressões da água (sucção), por consequência a resposta do M_R . De acordo com Vanapalli e Han (2013), os modelos que incorporam sucção geralmente são mais acurados na previsão do M_R em função do estado

de tensões. Portanto, justifica-se o foco desta pesquisa nas correlações de previsão entre Módulo Resiliente e Sucção.

Considera-se a importância da correlação entre sucção e módulo resiliente para a solução de problemas em obras de pavimentação, tais como hidráulicas e mecânicas. Os desafios encontrados pelos pesquisadores impõem o desenvolvimento de um modelo para solos de subleito que, preferencialmente, incorpore a sucção de uma forma simples, porém eficaz. Assim, este trabalho apresenta a revisão da literatura de alguns estudos que se utilizam dessas equações como ferramenta para a determinação do efeito da sucção no módulo resiliente.

3.3.3 Relação entre módulo de resiliência e sucção do solo

Para Han e Vanapalli (2016a) a sucção é um parâmetro importante para interpretar e prever o comportamento hidromecânico dos solos não saturados a partir das flutuações do regime de umidade do solo. Logo, investigações experimentais nos últimos anos destacaram a influência da sucção no módulo resiliente dos mais diversos materiais do pavimento, sendo alguns destes estudos: Khoury e Zaman (2004); Yang *et al.* (2008); Thom *et al.* (2008); Sawangsuriya, Edil e Benson (2009a); Khoury *et al.* (2012); Ng *et al.* (2013); Sivakumar *et al.* (2013); Ng e Zhou (2014); Abu-Farsakh *et al.* (2015); Salour e Erlingsson (2015); Han (2016); Vargas (2020).

Desse modo, observa-se na literatura o surgimento de diversas abordagens e técnicas de medição da sucção do solo a partir dos ensaios no triaxial cíclico, e isto com o intuito de investigar a influência da sucção no módulo resiliente dos materiais empregados em pavimentação. Portanto, ressalta-se a importância de estudarmos estes métodos a fim de podermos elucidar a discussão.

Nos últimos anos, o sistema de aparelhagem do ensaio do triaxial cíclico foi modificado e adaptado com vários instrumentos: sonda; transdutor; sensor de dissipação térmica; psicrômetro e sonda de sucção com a finalidade de medir e avaliar a variação conjunta do módulo resiliente e a sucção do solo (RODRIGUES, 1997; GUPTA *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2008; CRACIUN e LO, 2010; CARY e ZAPATA, 2011; NG *et al.*, 2013; SIVAKUMAR *et al.*, 2013; SALOUR, ERLINGSSON e ZAPATA, 2014; HAN, 2016; FREITAS, REZENDE e GITARANA JR., 2020).

O ensaio do triaxial modificado é caro e complicado, e requer profissionais treinados para conduzir os testes. Além disso, normalmente são necessários vários dias ou semanas para atingir as condições de equilíbrio com relação a cada valor de sucção aplicado para solos não saturados (NG *et al.*, 2013; NG e ZHOU (2014); HAN e VANAPALLI, 2016a; ZHANG *et al.*, 2018). Logo, a determinação confiável do módulo resiliente a partir deste método experimental com o controle de sucção do solo é demorada, e requer equipamentos sofisticados por vezes adaptados, bem como mão de obra qualificada.

A partir de modelos empíricos e ensaios de laboratório, vários pesquisadores propuseram na literatura equações para prever as correlações entre módulo resiliente (M_R) e sucção, (ψ) utilizando o teste triaxial cíclicos modificados (LYTTON, 1996; YANG *et al.*, 2005; LIANG *et al.*, 2008; YANG *et al.*, 2008; SAWANGSURIYA *et al.*, 2009a; CARY e ZAPATA, 2011; NG *et al.*, 2013; BA *et al.* 2013; SALOUR, ERLINGSSON e ZAPATA, 2014; NOKKAEW *et al.*, 2014; HAN, 2016; ZHANG *et al.*, 2018; QIAN *et al.*, 2018; FREITAS, REZENDE e GITARANA JR., 2020). Essas equações são geralmente utilizadas em projeto de pavimentos para determinação do efeito da sucção no módulo resiliente para diversos tipos de solo.

Os pesquisadores Sauer e Monismith (1968); Jin *et al.* (1994); Fredlund *et al.* (1975); Edris e Lytton (1976); Fredlund *et al.* (1977); Edil e Motan (1979); Li e Seling (1994) e Phillip (1996) foram os pioneiros no uso da sucção como parâmetro fundamental para interpretar a resposta do comportamento resiliente dos materiais do pavimento a partir das variações do teor de umidade do solo. Os autores relacionaram resultados de módulo de resiliência com a sucção em ensaios triaxiais de carga cíclica, e observaram a relação não linear entre o módulo de resiliência e a sucção.

É notório destacar que estudiosos têm se dedicado em catalogar e organizar os modelos (equações) com o intuito de padronizar e comparar as correlações M_R -sucção para diferentes materiais de pavimentação. De acordo com Azam *et al.* (2013); Gu *et al.* (2014) e Han e Vanapalli (2016a), os modelos podem ser divididos em três grupos, e com base nas diferentes abordagens usadas para analisar a influência M_R -sucção. O primeiro grupo é composto por relações empíricas que incorporam a mecânica de solos não saturados (Grupo A); o segundo grupo inclui modelos constitutivos que incorporam a contribuição da sucção do solo na aplicação das tensões de cisalhamento ou confinamento

(Grupo B); e o terceiro grupo é constituído por modelos que incluem o estado de tensões das variáveis nas condições não saturadas (Grupo C).

Em seguida, serão apresentadas algumas destas equações. Destaca-se que os solos utilizados para a obtenção destas equações foram classificados de acordo com a norma AASHTO M-145 (AASHTO, 2008).

- **Equações do GRUPO A**

O método empírico são equações que não fornecem justificativa teórica, mas são desenvolvidas com base em análises estatísticas realizadas em um grande banco de dados de resultados experimentais para solos com propriedades semelhantes (ZAPATA *et al.*, 2007). A partir da literatura, foram levantadas algumas equações empíricas que correlacionam a influência módulo de resiliência (M_R) - sucção (ψ).

Johnson *et al.* (1986) propôs a equação 3.33, para solos classificados como arenosos.

$$M_R = 1,35 \times 10^6 \times (101,36 - \psi)^{2,36} (\theta_1)^{3,25} (\gamma_d)^{3,06} \quad \text{(Equação 3.33)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

ψ é a sucção total [kPa];

θ_1 é a invariante das tensões [kPa];

γ_d é a densidade seca [Mg/m³].

Parreira e Gonçalves (2000) propuseram a equação 3.34, a partir de solos lateríticos brasileiro, classificados como A-7-6, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 - 87.500 kPa.

$$M_R = 14,10 \sigma_d^{0,782} \psi^{0,076} \quad \text{(Equação 3.34)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

ψ é a sucção total [kPa].

σ_d é a tensão desvio [kPa].

Ceratti *et al.* (2004) propuseram a equação 3.35, a partir de solos lateríticos brasileiros, classificados como A-7-6, ao longo da faixa de sucção de solo *in situ* de 0 - 14 kPa.

$$M_R = 142 + 16,9 \psi_m \quad \text{(Equação 3.35)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

ψ_m é a sucção matricial [kPa].

Sawangsuriya *et al.* (2009a) propuseram as equações 3.36 e 3.37, a partir de solos de Minnesota, nos Estados Unidos da América, classificados como A-4 e A-7-6, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 10.000 kPa.

$$\frac{M_R}{M_{RSAT}} = -5,61 + 4,54 \log (\psi) \quad \text{(Equação 3.36)}$$

$$\frac{M_R}{M_{ROPT}} = -0,24 + 0,25 \log (\psi) \quad \text{(Equação 3.37)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [kPa];

M_{RSAT} é o módulo de resiliência na condição saturada [kPa];

M_{ROPT} é o módulo de resiliência na condição de teor de umidade ótimo [kPa];

ψ é a sucção total [kPa].

Ba *et al.* (2013) propuseram a equação 3.38, a partir de quatro tipos de solos do Senegal, classificados como material base granular, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 100 kPa.

$$\frac{M_R}{M_{ROPT}} = -0,385 + 0,267 \log (\psi) \quad \text{(Equação 3.38)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

M_{ROPT} é o módulo de resiliência na condição de teor de umidade ótimo [MPa];

ψ é a sucção [kPa].

- **Equações do GRUPO B**

No Grupo B, são apresentados modelos disponíveis na literatura que incorporam a contribuição da sucção do solo na aplicação das tensões de cisalhamento ou confinamento.

Loach (1987) propôs a equação 3.39 a partir de três solos do Reino Unido, classificados como grãos finos ao longo da faixa de sucção de solo de 0 - 100 kPa.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{k_1} \left[\frac{c \sigma_c + \psi}{\sigma_d} \right]^{k_2} \quad \text{(Equação 3.39)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

ψ é a sucção [kPa];

σ_d é a tensão desvio [kPa];

σ_c é a tensão confinante [kPa];

k_1 e k_2 são parâmetros de regressão;

c é o fator compressibilidade.

Jin *et al.* (1994) propuseram a equação 3.40, a partir de dois tipos de solos dos Estados Unidos da América, classificados como solos coesivos e granulares.

$$\Delta M_R = k_1 k_2 \theta_b^{k_2-1} (\Delta \theta_T + \Delta \theta_\psi) \quad \text{(Equação 3.40)}$$

Em que:

ΔM_R é a variação do módulo de resiliência [MPa];

k_1 e k_2 são parâmetros de regressão;

ψ é a sucção [kPa];

θ_b é a tensão confinante [kPa];

$\Delta \theta_T$ é a variação da tensão confinante devido a temperatura [kPa];

$\Delta \theta_\psi$ é a variação da tensão confinante devido a sucção [kPa].

Lytton (1996) propôs a equação 3.41, a partir de solos do estado do Texas, nos Estados Unidos da América, classificados como grãos de base granular.

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta_b + 3 f \theta \psi_m}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.41)}$$

Em que:

- M_R é o módulo de resiliência [MPa];
- k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;
- P_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);
- f é o fator de saturação ($1 < f < 1/\theta$);
- θ_b é a tensão confinante [kPa];
- θ é o teor de água volumétrico;
- ψ_m é a sucção matricial [kPa];
- τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa].

Health *et al.* (2004) propuseram a equação 3.42, a partir de solos do estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América, classificados como grãos de base granular.

$$M_R = k_1 P_a \left[\frac{\left(\frac{\theta_b}{3}\right) - u_a + \chi \psi}{P_a} \right]^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a}\right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.42)}$$

Em que:

- M_R é o módulo de resiliência [MPa];
- k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;
- P_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);
- θ_b é a tensão confinante [kPa];
- u_a é a pressão do ar nos poros;
- χ é o parâmetro aplicável à sucção matricial na equação de Bishop para solos não saturados;
- ψ é a sucção [kPa];
- σ_d é a tensão desvio [kPa].

Yang *et al.* (2005) propuseram a equação 3.43, a partir de dois tipos de solos de Taiwan, na China, classificados como solos de granulação fina (A-7-5 e A-7-6), ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 10.000 kPa.

$$M_R = k_1 (\sigma_d + \chi \psi_m)^{k_2} \quad \text{(Equação 3.43)}$$

Em que:

- M_R é o módulo de resiliência [MPa];
- k_1 e k_2 são parâmetros de regressão;

σ_d é a tensão desvio [kPa];

χ é o parâmetro aplicável à sucção matricial na equação de Bishop para solos não saturados;

ψ_m é a sucção matricial [kPa].

Liang *et al.* (2008) propuseram a equação 3.44, a partir de dois tipos de solos, classificados como solos de granulação fina (A-4 e A-6), ao longo da faixa de sucção de solo de 150 – 380 kPa.

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta_b + \chi \psi_m}{P_a} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.44)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

P_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

θ_b é a tensão confinante [kPa];

χ é o parâmetro aplicável à sucção matricial na equação de Bishop para solos não saturados;

ψ_m é a sucção matricial [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa].

Oh *et al.* (2012) propuseram a equação 3.45, a partir de solos do estado da Flórida, nos Estados Unidos da América, classificados como solos arenosos (A-2-4 e A-3).

$$M_R = k_1 p_a \left[\frac{\theta_b + 3 k_4 \psi \theta}{p_a} \right]^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.45)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (~100 kPa);

θ_b é a tensão confinante [kPa];

θ é o teor de água volumétrico;

ψ é a sucção total [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa].

Sahin *et al.* (2013) propuseram a equação 3.46, a partir de solos classificados como base granular.

$$M_R = k_1 p_a \left[\frac{\theta_b - 3 f \theta \left(\psi_0 + \beta \frac{\theta_b}{3} + \alpha \tau_{oct} \right)}{p_a} \right]^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.46)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

θ_b é a tensão confinante [kPa];

f é o fator de saturação ($1 < f < 1/\theta$);

p_a é a pressão atmosférica (~100 kPa);

θ é o teor de água volumétrico;

ψ_0 é a sucção inicial [kPa];

α e β são parâmetros de poro pressão de Henkel;

ψ é a sucção [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa].

Yao *et al.* (2018) propuseram a equação 3.47, a partir de solos do sul da China, classificados como argila arenosa, ao longo da faixa de sucção de solo de 0,1 – 940 kPa.

$$M_R = k_0 p_a \left(\frac{\psi}{p_a} + 1 \right)^{k_1} \left(\frac{\theta_m}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.47)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_0 , k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (~100 kPa);

θ_m é a tensão mínima principal ($\sigma'_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) [kPa];

ψ é a sucção [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa].

• Equações do GRUPO C

No Grupo C, são apresentados modelos que incluem o estado de tensões das variáveis nas condições não saturadas.

Fredlund, Bergan e Wong (1977) propuseram a equação 3.48, a partir de solos glaciais da província de Saskatchewan, no Canadá, classificados como solos glaciais, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 1.000 kPa.

$$\log M_R = c_{1d} - m_{1d} (\sigma_d) \quad \text{(Equação 3.48)}$$

Em que:

$\log M_R$ é o módulo de resiliência a partir da curva log [MPa];

σ_d é a tensão desvio [kPa];

c_{1d} é a interseção;

m_{1d} é a inclinação da relação σ_d versus $\log M_R$;

c_{1d} e m_{1d} são em função da ψ_m .

Oloo (1988) propuseram a equação 3.49 para materiais classificados como graúdos, e as equações 3.50 e 3.51 para materiais classificados como finos.

$$M_R = k \theta_b^{m_b} + k_s \psi \quad \text{(Equação 3.49)}$$

$$k_1 > \theta_b := M_R = k_2 - k_3 (k_1 - \theta_b) + k_s \psi \quad \text{(Equação 3.50)}$$

$$k_1 < \theta_b := M_R = k_2 + k_4 (\theta_b - k_1) + k_s \psi \quad \text{(Equação 3.51)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

θ_b é a tensão confinante [kPa];

ψ é a sucção [kPa];

$m_b, k, k_s, k_1, k_2, k_3$ e k_4 são parâmetros de regressão.

Gupta *et al.* (2007) propuseram as equações 3.52 e 3.53 a partir de quatros tipos de solos de Minnesota, nos Estados Unidos da América, classificados como solos de granulação fina (A-4 e A-7-6), ao longo da faixa de sucção de solo de 10 – 10.000 kPa.

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta_b - 3 k_4}{p_a} \right)^{k_2} \left(k_5 + \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} + \alpha_1 \psi_m^{\beta_1} \quad \text{(Equação 3.52)}$$

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta_b}{p_a} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} + k_{us} p_a \Theta^K \psi_m \quad \text{(Equação 3.53)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{us}, \alpha_1, \beta_1$ e K são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

θ_b é a tensão confinante [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa];

ψ_m é a sucção matricial [kPa];

$\Theta (\theta / \theta_s)$ é o teor de água volumétrica normalizado;

θ é o conteúdo volumétrico da água;

θ_s é o conteúdo volumétrico de água quando a sucção é zero.

Khoury *et al.* (2009) propuseram a equação 3.54, a partir de solos de Oklahoma, nos Estados Unidos da América, classificados como A-4 e A-7, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 6.000 kPa.

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta_b}{p_a} \right)^{k_2} \left(k_4 + \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} + \alpha_1 \psi_m^{\beta_1} \quad \text{(Equação 3.54)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

$k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha_1$ e β_1 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

θ_b é a tensão confinante [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa];

ψ_m é a sucção matricial [kPa].

Caicedo *et al.* (2009) propuseram as equações 3.55 e 3.56 a partir de 20 amostras de solos com diferentes propriedades mecânicas da Cordilheira dos Andes, na Colômbia, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 200 kPa.

$$M_R = k_1 p_a \left(1 + k_2 \frac{\sigma_d}{p_a} \right) \left(\frac{\psi_m}{p_a} \right)^{k_3} \frac{f(e)}{f(0,33)} \quad \text{(Equação 3.55)}$$

$$f(e) = \frac{(1,93 - e)^2}{(1 + e)} \quad \text{(Equação 3.56)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

σ_d é a tensão desvio [kPa];

ψ_m é a sucção matricial [kPa];

e é o índice de vazios.

Khoury *et al.* (2011) propuseram a equação 3.57 a partir da mistura de dois tipos de solos obtidos comercialmente. A primeira amostra de solo é o *Sil-Co-Sil 250*, adquirido nas empresas *U.S. Silica Company* e *Glass Beads*. O segundo solo é o *Size BT-9*, adquirido na empresa *Zero Products*. Os autores realizaram testes em diferentes valores de sucção do solo ao longo da faixa de 0 – 100 kPa.

$$M_R = \left[k_1 p_a \left(\frac{\theta_b}{p_a} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3} + (\psi - \psi_0) x \left(\frac{\theta_d}{\theta_s} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)} \right] x \left(\frac{\theta_d}{\theta_w} \right) \quad \text{(Equação 3.57)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

θ_b é a tensão confinante [kPa];

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa];

ψ é a sucção [kPa];

ψ_0 é o valor de sucção do solo no momento da execução do teste [kPa];

θ_d é o teor volumétrico da água através da curva de secagem;

θ_s é o conteúdo volumétrico de água quando a sucção é zero;

θ_w é o teor volumétrico da água através da curva de umedecimento correspondente ao mesmo valor de sucção do θ_d ;

n é um parâmetro do modelo obtido para a SWCC de Fredlung e Xing (1994).

Cary e Zapata (2011) propuseram a equação 3.58 a partir de dois grupos de solos, sendo o primeiro do Arizona, nos Estados Unidos da América; e o segundo da Suécia,

sendo classificados como areia argilosa (A-1-a e A-4) e arenosos (A-4 e A-2-4), ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 250 kPa e 0 – 450 kPa, respectivamente.

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta_{net} - 3 \Delta u_{w-sat}}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \left(\frac{\psi_{m0} - \Delta \psi_m}{p_a} + 1 \right)^{k_4} \quad \text{(Equação 3.58)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

k_1, k_2, k_3 e k_4 são parâmetros de regressão;

p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

$\theta_{net} (\theta_b - 3u_a)$ é o invariante de tensões do líquido;

u_a é a pressão do ar nos poros;

Δu_{w-sat} é o aumento na poro-pressão da água em condições não saturadas;

τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa];

ψ_{m0} é a sucção matricial inicial [kPa];

$\Delta \psi_m$ é a mudança relativa na sucção matricial em relação ao ψ_{m0} devido ao aumento na poro-pressão da água em condições não saturadas [kPa].

Ng *et al.* (2013) propuseram a equação 3.59, a partir de solos de Hong Kong, na China, classificados como solos A-7-6, ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 250 kPa.

$$M_R = M_0 \left(\frac{p}{p_r} \right)^{k_1} \left(1 + \frac{q_{cyc}}{p_r} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\psi}{p} \right)^{k_3} \quad \text{(Equação 3.59)}$$

Em que:

M_R é o módulo de resiliência [MPa];

M_0 é o valor do módulo para um valor de referência quando $\psi=0$, $(p - u_a) = p_r$ e

$q_{cyc} = p_r$ [MPa];

u_a é a pressão do ar nos poros;

k_1, k_2 e k_3 são parâmetros de regressão;

p é a pressão atmosférica (101,3 kPa);

p_r é a pressão de referência (1 kPa);

q_{cyc} é a tensão de cisalhamento cíclica [kPa];

ψ é a sucção [kPa].

Azam *et al.* (2013) propuseram a equação 3.60 a partir de materiais reciclados do Sul da Austrália, e foram utilizados dois tipos de materiais provenientes de reciclagem fornecidos pelas empresas *ResourceCo* e *Adelaide Resource Recovery*. Os autores realizaram testes em diferentes valores de sucção do solo ao longo da faixa de 0 – 10 kPa.

$$M_R = k \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^{k_1} \left(\frac{\tau_{oct}}{\tau_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{\psi_m}{p_a} \right)^{k_3} \left[\frac{DDR (1 - k_4 RCM/100)}{100} \right]^{k_5} \quad \text{(Equação 3.60)}$$

Em que:

- M_R é o módulo de resiliência [MPa];
- k, k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 são parâmetros de regressão;
- $\sigma_m (\theta_b/3)$ é a tensão normal [kPa];
- θ_b é a tensão confinante [kPa];
- p_a é a pressão atmosférica (101,3 kPa);
- τ_{oct} é a tensão octaédrica [kPa];
- τ_{ref} é a tensão de cisalhamento de referência [kPa];
- ψ_m é a sucção matricial [kPa];
- DDR é a razão da densidade seca [%];
- RCM é a porcentagem de material reciclado [%].

Han e Vanapalli (2015) propuseram a equação **Erro! Fonte de referência não é encontrada.**3.61 a partir de 11 tipos de solos do Canadá, EUA, Brasil e China, classificados como solos de granulação fina (A-6, A-7-6, A-7-5 e A-4), ao longo da faixa de sucção de solo de 0 – 10.000 kPa.

$$\frac{M_R - M_{RSAT}}{M_{ROPT} - M_{RSAT}} = \frac{\psi}{\psi_{OPT}} \left(\frac{S}{S_{OPT}} \right)^\xi \quad \text{(Equação 3.61)}$$

Em que:

- M_R é o módulo de resiliência para qualquer grau de saturação S [MPa];
- M_{RSAT} é o módulo de resiliência em condição saturada [MPa];
- M_{ROPT} é o módulo de resiliência do material na umidade ótima [MPa];
- ψ é a sucção [kPa];
- ψ_{OPT} é a sucção na umidade ótima [kPa];
- S é o grau de saturação do solo;
- S_{OPT} é o grau de saturação do solo na umidade ótima;

ξ é o parâmetro do modelo [= 2,0].

Para a utilização destas equações, é necessário realizar os ensaios de sucção geralmente com diferentes teores de umidade (YANG, HUANG e TAI, 2005). Segundo Han e Vanapalli (2016a), a sucção das amostras pode ser medida antes ou após a conclusão dos ensaios no triaxial cíclico, utilizando-se o método do papel de filtro ou o método da placa de pressão nula, uma vez que são simples e baratos. Em concordância com o apresentado anteriormente nesta pesquisa, no tópico 3.3.1, os dispositivos e métodos para medir a sucção do solo e a curva característica de sucção dos solos são numerosos, diversos e bem documentados. Cada um dos métodos de medição e controle da sucção possui vantagens e desvantagens em sua utilização.

Segundo Vanapalli e Han (2013), o Grupo A que trata de modelos empíricos pode superestimar os valores do Módulo de Resiliência e seus parâmetros de calibração. Os autores ressaltam que os modelos só devem ser usados para solos muito similares aos que foram utilizados para a sua formulação. Os modelos que incorporam a contribuição da sucção, Grupo B e Grupo C, geralmente são mais acurados para a previsão do Módulo de Resiliência em função do estado de tensões e da sucção do solo. Enfim, o sucesso dos modelos depende significativamente do uso de uma base de dados extensa, e com uma grande quantidade de tensões e sucções dos solos.

3.3.4 Relação entre o módulo de resiliência e a curva característica dos solos

Como já mencionado, a curva característica de um solo é descrita pela relação da sucção em função do grau de saturação ou teor de umidade volumétrica. Segundo Ceratti *et al.* (1996), a partir da curva característica de um solo é possível relacionarmos o módulo de resiliência e a sucção, além de outras propriedades mecânicas. Desta forma, é plausível prever, a partir desta curva, variações do M_R sujeitas às alterações sazonais do ambiente (umidade). É notório ressaltarmos que na literatura diversos autores têm utilizado a curva característica como ferramenta para previsão das propriedades não lineares dos solos não saturados com relação à sucção. Tais pesquisadores são Fredlund *et al.* (1994); Fredlund (2004); Khoury e Zaman (2004); Yang *et al.* (2005); Vanapalli e Mohamed (2007); Cary e Zapata (2011); Ng *et al.* (2012); Vanapalli e Han (2013); Han, 2016; Zhang *et al.* (2018) e Vargas (2020).

Ainda de acordo com Ceratti *et al.* (1996), a partir das curvas características dos materiais (sucção x umidade) e das curvas M_R x umidade, foi avaliada a relação sucção x M_R para diferentes tensões desvio, e os pesquisadores mostraram que as curvas M_R x umidade tiveram resultados semelhantes ao comportamento sucção x M_R .

De acordo com Vargas (2020), a metodologia mais simples para utilizar a curva característica para obtenção de modelos para a previsão do M_R é baseada na determinação de diferentes níveis de sucção para diferentes variações de umidade, e na realização de ensaios de M_R para esses níveis de umidade. Logo, esse procedimento apresenta boa precisão para determinar os valores do módulo resiliente, e é mais vantajoso do que o ensaio do triaxial modificado, tendo-se em vista que este ensaio em laboratório é moroso e possui alto custo, como já destacado.

Estudos mais recentes como os de Yang *et al.* (2005), Khoury *et al.*, 2011, Ng *et al.* (2013) e Han e Vanapalli (2016a) apresentaram uma forte relação entre a curva característica e a variação do M_R , tanto para solos finos como graúdos. A partir desta relação, os autores propuseram modelos de previsão de M_R que consideram a influência da sucção de forma direta. Entretanto, a literatura ainda carece de pesquisas neste ramo, principalmente em caráter de desenvolvimento nacional, pois os solos tropicais podem apresentar comportamentos diferentes aos dos solos temperados na presença de água.

3.4 Considerações finais

Durante a elaboração deste capítulo, buscou-se um levantamento sobre as influências da sucção, e por conseguinte a umidade sobre o módulo resiliente. Procurou-se entender de que modo os ensaios de previsão do comportamento hidromecânico poderiam ser aplicados em pavimentos.

Desse modo, constatou-se que a água produz grande efeito nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes e no desempenho do pavimento ao longo da sua vida útil. Somando a isso, os efeitos ambientais causados pelos períodos de seca e de chuva alteram o estado de saturação das obras de engenharia. Portanto, para representar a realidade dessas infraestruturas é importante o estudo dos solos de subleito, considerando-se o comportamento mecânico dos materiais no estado não saturado. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de avaliar o comportamento

hidromecânico do subleito, conforme por nós apresentado, levando-se em consideração as características mecânicas e hidráulicas, ou seja, sucção e M_R , respectivamente.

Portanto, destaca-se a importância de considerar a sucção como uma variável independente na determinação do módulo resiliente e avaliação do comportamento hidromecânico dos solos. Além disso, a metodologia baseada na utilização da curva característica do solo se demonstrou eficiente para a obtenção de modelos de previsão do módulo resiliente (M_R) com a influência da sucção, e apresentou vantagens em relação ao ensaio do triaxial modificado que é um processo laborioso e de alto custo, como já mencionado.

Diante disso, nesta pesquisa procurou-se estudar a relação entre a sucção e o módulo resiliente dos solos de subleito de pavimentos a partir de ensaios de laboratório simultâneos ou separados. Para o desenvolvimento deste estudo, optou-se por realizar os ensaios de forma separada, uma vez que são mais práticos e menos onerosos do que aqueles realizados de forma simultânea. Sendo assim, a literatura indica que é possível correlacionar o módulo resiliente com a sucção por meio da relação do M_R com a umidade e a curva característica. Por fim, este trabalho de pesquisa buscou avaliar o comportamento hidromecânico dos distintos solos a partir do módulo resiliente por meio da determinação de diferentes faixas de umidade e níveis de sucção.

4. PROPOSTA DE PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

4.1 Considerações iniciais

Em conformidade com os objetivos propostos por essa tese, e buscando estruturar a pesquisa a partir das observações da revisão da literatura, é proposto o procedimento metodológico para a implementação de uma Análise de Ciclo de Vida de pavimentos a partir dos efeitos provocados pela presença de água no subleito.

Nesse contexto, o procedimento proposto é composto por oito grandes etapas que se subdividem em tópicos menores, os quais serão explorados separadamente. Logo, a pesquisa foi estruturada em oito partes que contemplam:

- (1) Determinação dos materiais das camadas do pavimento;
- (2) Caracterização mecânica e hidromecânica dos materiais;
- (3) Dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento;
- (4) Determinação do Inventário de Análise de Ciclo de Vida (IACV);
- (5) Determinação da Análise do Impacto de Ciclo de Vida (AICV);
- (6) Determinação dos indicadores de desempenho ambiental;
- (7) Análise de sensibilidade;
- (8) Análise de incerteza.

O procedimento metodológico proposto encontra-se ilustrado na Figura 4.1.

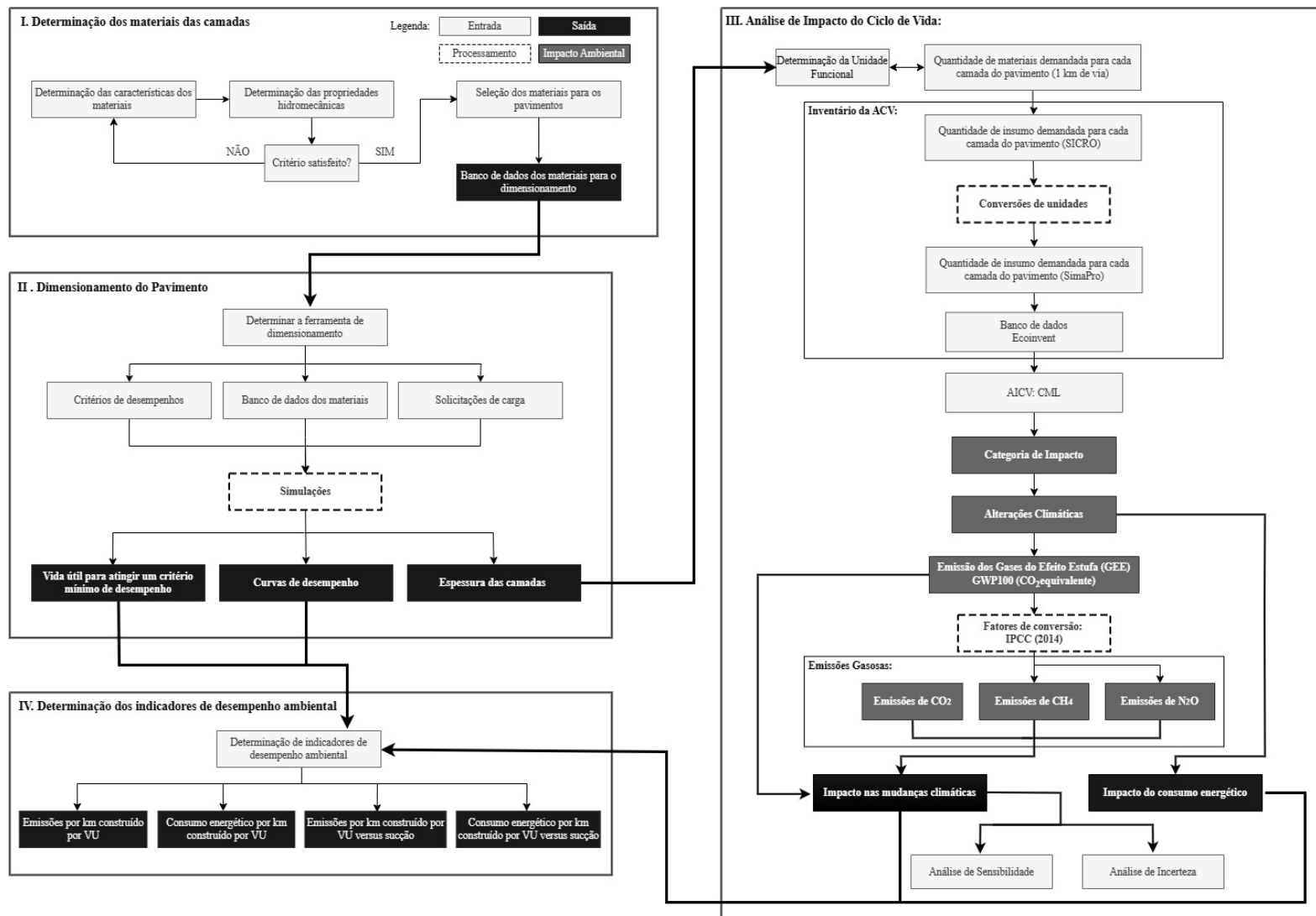


Figura 4.1 – Proposta de procedimento metodológico desta pesquisa.

4.2 Determinação dos materiais das camadas do pavimento

Nesta etapa, deve-se definir os materiais para as camadas das estruturas do pavimento, classificando-os de acordo com metodologia mecanístico-empírica. De acordo com o Manual do DNIT (DNIT, 2006) e o Manual de Utilização do programa MeDiNa (DNIT, 2020), pode-se utilizar materiais naturais para emprego em subleitos, em sub-bases, em bases e revestimento.

Os insumos para estas camadas podem ser provenientes de jazidas, pedreiras ou areais e, antes da sua aplicação em campo, devem ser conhecidas as propriedades mecânicas e físicas obtidas a partir de ensaios laboratoriais. Desse modo, os materiais produzidos em usinas ou centrais, destinados as diversas camadas do pavimento, podem ser definidos pelo engenheiro projetista que deve pré-estabelecer os parâmetros mecânicos.

4.2.1 Classificação do Projeto de Vias

A classificação da rodovia influencia diretamente na escolha dos materiais e tecnologias utilizadas na construção, bem como na vida útil do pavimento. Por isso, é importante enquadrar o pavimento estudado à classe de projeto, pois esses parâmetros devem ser seguidos na construção das infraestruturas.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), sucessor do antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), não estabelece uma forma específica de classificação de rodovias, deixando essa responsabilidade para os órgãos rodoviários estaduais. No entanto, apesar de ter sido publicado há mais de vinte anos, o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais é o documento existente no Brasil que orienta os projetos geométricos de rodovias (DNER, 1999). Dessa forma, este trabalho seguirá as normativas desse manual para a classificação do projeto de vias.

Os critérios de classificação técnica do projeto de vias, conforme o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais, são baseados na largura da plataforma de rolamento, na presença de acostamento e no volume diário médio anual de veículos (VMA) que trafegam na rodovia (DNER, 1999). As Tabelas IV, V e VI, do ANEXO I, apresentam as características das classes das vias em cinco categorias.

A largura da pista de rolamento é um fator importante na segurança do tráfego pois, quanto maior a largura, menor é o risco de acidentes. O acostamento é uma faixa lateral à pista de rolamento que proporciona segurança e conforto para os usuários da via, permitindo a parada de veículos em caso de emergência e facilitando a manutenção da rodovia. Todos esses parâmetros são importantes para a classificação técnica do projeto de vias, garantindo-se a segurança e o conforto dos usuários, bem como a adequação da rodovia às necessidades do tráfego.

4.3 Caracterização mecânica e hidromecânica dos materiais

Os ensaios nos materiais servem para assegurar a distinção entre os diversos tipos existentes na natureza, de modo a se garantir a escolha de um material que resista de forma adequada às cargas que o pavimento deverá suportar. Logo, para cada tipo de ensaio existe uma norma brasileira ou estrangeira específica para nortear quanto aos procedimentos executáveis.

Os mais importantes desses ensaios são: Ensaio de determinação do módulo de resiliência de Solos (DNIT, 2018a); Ensaio de determinação do módulo de resiliência de Misturas asfálticas (DNIT, 2018b); Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral de Misturas asfálticas (DNIT, 2018c); Ensaio de determinação da deformação permanente de Solos (DNIT, 2018d); Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada Misturas asfálticas (DNIT, 2018e); e Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência a deformação permanente de Misturas asfálticas (DNIT, 2018f).

Para avaliar o comportamento hidromecânico dos solos aplicados em subleitos é necessário realizar os ensaios de sucção, conforme apresentando no capítulo 3, e da umidade que é recorrente no procedimento atual de acordo com a proposta deste trabalho em correlacionar com o M_R .

4.4 Dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento

Do ponto de vista da utilização do método mecanístico-empírico para o dimensionamento dos pavimentos avaliados nesse trabalho, podemos especificar as seguintes etapas:

- (a) determinar os materiais das camadas do pavimento;

- (b) determinar a influência da sucção e umidade no M_R em materiais do subleito;
- (b) determinar o período de avaliação;
- (c) determinar o tráfego de solicitação, comum a todas as soluções;
- (d) estabelecer espessuras para as camadas;
- (e) calcular o desempenho de cada pavimento para cada critério de ruptura;
- (f) verificar se os arranjos de camadas (materiais e espessuras) atendem aos critérios de ruptura para o período de análise; e caso não atendam, deve-se propor um novo conjunto de espessuras.

A Figura 4.2 corresponde aos parâmetros de entrada para o dimensionamento do pavimento empregando o programa computacional MeDiNa, os quais são: os dados do tráfego, dados da estrutura do pavimento e as características dos materiais.

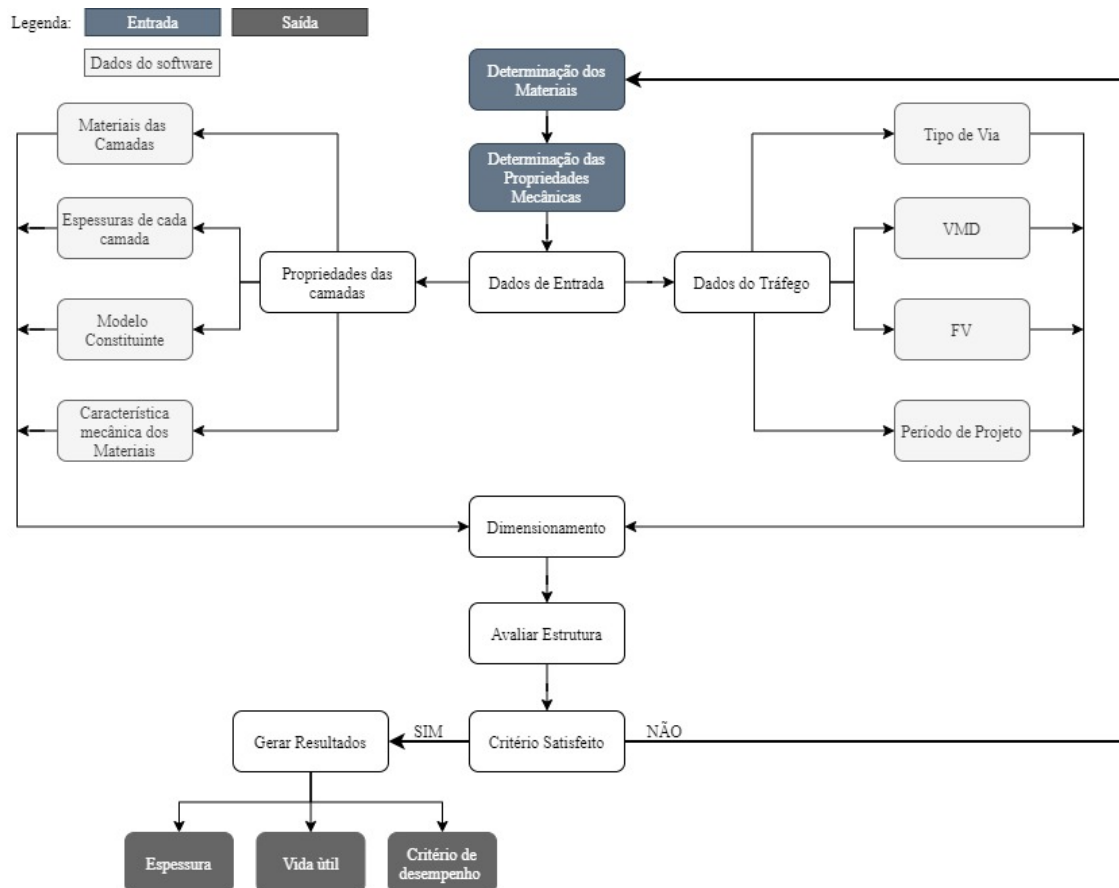


Figura 4.2 - Parâmetros de entrada para dimensionamento do pavimento: *software* MeDiNa.

As simulações devem ser realizadas mantendo-se constante os materiais da base, sub-base e revestimento asfáltico, variando-se apenas o material do subleito para cada situação. Assim, é possível a investigação das principais alterações nas espessuras das

camadas dimensionadas, bem como a inspeção do percentual de área trincada e a verificação do impacto na vida útil do pavimento a partir das diversas variações de subleitos.

4.5 Determinação do Inventário de Análise de Ciclo de Vida

De acordo com a ISO 14040 (2009a), as quatro fases de uma ACV, ou seja, objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida – ICV, avaliação do impacto do ciclo de vida – AICV, e interpretação dos resultados devem compor também essa etapa.

A ACV permite uma avaliação mais ampla na tomada de decisão nas estratégias de construção de infraestruturas de transportes (HUANG *et al.*, 2021; CONG *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2019; VEGA ARAÚJO, SANTOS e MARTINEZ-ARGUELLES, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2020). Desse modo, o escopo dessa etapa é delimitado nas fases de extração e produção de insumos; fabricação dos materiais e usinagem; transporte dos insumos necessários para as atividades previstas em cada cenário e, por fim, a construção que abrange a operação de equipamentos de engenharia. A fase de construção é obtida pelo consumo de combustível dos equipamentos de engenharia em função das suas horas produtivas.

Com base nas espessuras das camadas determinadas através do dimensionamento dos pavimentos, juntamente com as especificações geométricas da via, deve-se estimar a quantidade de material necessária para construir 1 km de via. Após definir o escopo do projeto e obter essa estimativa de quantidade de material, a etapa seguinte envolve o cálculo dos insumos utilizando-se a ferramenta SICRO.

O SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras) é amplamente empregado para estimar os custos e recursos necessários em obras de infraestrutura. Pode-se elaborar o inventário utilizando as informações do SICRO que trata de um processo que envolve a coleta e a organização dos dados fornecidos pelo sistema para quantificar os insumos, materiais e processos envolvidos em um projeto rodoviário. Assim, a partir das composições de cada camada do pavimento determinadas no SICRO, é possível obter os insumos através da mesma ferramenta, alinhando-se com as fases previamente estabelecidas no escopo.

Essa abordagem leva em conta não apenas os aspectos de produção, mas também a operação mecânica dos equipamentos envolvidos no processo.

Nesse sentido, o encadeamento de etapas são:

- a) Identificação dos componentes do projeto: Primeiramente, inicia-se identificando-se os diferentes componentes do projeto de infraestrutura, tais como os materiais de construção; o projeto geométrico; a espessura das camadas do pavimento; equipamentos e processos específicos.
- b) Acesso às composições do SICRO: Utiliza-se as composições do SICRO referentes aos componentes identificados do tópico “a”. O SICRO fornece detalhes sobre os insumos, as quantidades e processos para cada componente, considerando a operação dos equipamentos e as características da obra.
- c) Extração dos dados: São extraídas as informações relevantes das composições do SICRO para cada componente do projeto. Isso inclui as quantidades de materiais; os diversos consumos de energia; a distância média de transporte (DMT); o tempo de operação de equipamentos, dentre outros.
- d) Compilação e organização: São compilados os dados extraídos, os quais são organizados numa estrutura coerente, agrupando-os de acordo com as diferentes fases do ciclo de vida do projeto, como a extração de materiais; a produção dos insumos; usinagem; transporte; operação do maquinário e construção.
- e) Conversões de unidades: Se necessário, realiza-se conversões de unidades para garantir que todas as informações estejam na mesma unidade de medida, uma vez que tal procedimento é importante para a coerência do inventário. Cabe ressaltarmos que nem todos os insumos do SICRO possuem as mesmas unidades da base de dados Ecoinvent do *software* SimaPro.
- f) Integração com a Ferramenta de ACV: Após as conversões de unidades dos quantitativos, é essencial alinhar os insumos e as composições das etapas do escopo, conforme definidos pelo SICRO, com o banco de dados da Ecoinvent. Isso é viabilizado por meio da integração com o *software* SimaPro.

4.6 Determinação da Análise do Impacto de Ciclo de Vida

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) envolve a conversão dos resultados dos processos do Inventário da Análise do Ciclo de Vida (IACV) de infraestruturas de pavimentos sob impactos ambientais, a fim de categorizá-los nos indicadores de impactos intermediários ou finais.

Diante disso, o SimaPro oferece uma variedade de métodos de AICV que podem ser escolhidos de acordo com as necessidades e o escopo da análise. Algumas opções de métodos de AICV disponíveis no SimaPro incluem: CML-IA, Environmental Prices, Ecological scarcity 2021, EF 3.0 Method (adaptado), IMPACT World+, LC-IMPACT, ReCiPe 2016, BEES e TRACI 2.1.

Como já explanado no capítulo 2, tópico 2.6.2, os métodos de AICV mais utilizados no setor de pavimentação são: CML – IA, ReCiPe 2016, IMPACT World+ e TRACI. De acordo com Aryan, Dikshit e Shinde (2023), *software* SimaPro 9.4.0.2, o banco de dados Ecoinvent e método de AICV CML, são os mais utilizados para elaboração da ACV em pavimentação, e por isso foram utilizados nesta pesquisa.

O método CML oferece uma variedade de categorias de impacto que podem ser utilizadas para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo. Os indicadores de impactos são intermediários, tais como acidificação, eutrofização, alterações climáticas, dentre outros. A categoria de impacto Alterações Climáticas é frequentemente avaliada utilizando o indicador Efeito Estufa (GWP) com uma unidade de tempo específica. No caso do GWP, a unidade de tempo geralmente utilizada é 100 anos, sendo denotada como GWP_{100} (Potencial de Aquecimento Global a 100 anos).

O indicador GWP_{100} é uma métrica que avalia o potencial de aquecimento global de diferentes gases de efeito estufa, comparando-os com o dióxido de carbono (CO_2) ao longo de um período de 100 anos, tendo como unidade emissão em CO_2 equivalente. Esse indicador mede a quantidade de calor que um determinado gás é capaz de reter na atmosfera; contribuindo, assim, para o efeito estufa.

O *software* SimaPro possibilita, ao selecionar o indicador GWP_{100} , quantificar individualmente os principais gases do efeito estufa emitidos ao longo do ciclo de vida

do pavimento em termos de seu potencial de aquecimento global durante um período de 100 anos, em unidade de $\text{CO}_2 \text{Eq}$. Logo, os gases que mais contribuem para o efeito estufa são CO_2 , CH_4 e N_2O . Diante disso, para obtenção da contribuição da emissão dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O em unidade de massa, foi utilizado fatores de conversão (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Fator de conversão dos principais gases de efeito estufa em relação ao Potencial de Aquecimento Global.

Substância	Vida útil	GWP	
		Efeito cumulativo (20 anos)	Efeito cumulativo (100 anos)
CO_2	indeterminado	1	1
CH_4	12,4	84	28
N_2O	121,0	264	265

Fonte: adaptado de (IPCC, 2014).

Essa conversão permite avaliar a contribuição relativa de diferentes gases de efeito estufa para o aquecimento global a curto e médio prazos, ajudando a entender os impactos climáticos dessas emissões ao longo do tempo.

Ainda pelo SimaPro, pode-se obter os dados de energia requerida por meio dos insumos, e especificamente dos equipamentos que possuem consumo energético de combustíveis, ou elétricos, feito através da integração com bancos de dados de ciclo de vida, como o Ecoinvent, que contêm informações detalhadas sobre os impactos ambientais e o consumo de recursos associados a diferentes produtos, processos e atividades.

4.7 Determinação dos indicadores de desempenho ambiental

Diversos modelos vêm sendo desenvolvidos na literatura com o intuito de demonstrar os inventários formados e os valores unitários das emissões ao meio ambiente (SANTOS, 2015b; ANDRADE, 2016; ISLAM *et al.*, 2016; CHEN e WANG, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2020; NASCIMENTO, 2021).

Logo, para se determinar os indicadores de desempenho ambiental é necessário unificar as etapas anteriores, como: (a) às características do pavimento, os parâmetros de dimensionamento e do comportamento hidromecânico; (b) às estimativas dos impactos ambientais do ciclo de vida dos pavimentos. Cabe destacar que a unidade funcional proposta, comumente utilizado, é km de via construído. Em detrimento disso, os

indicadores propostos são: (a) emissões em CO₂ Eq. por km construído por vida útil (VU); e (b) consumo energético por km construído por vida útil (VU).

4.7.1 Determinação dos indicadores de desempenho ambiental e o efeito da sucção

Para avaliar o impacto ambiental, de CO₂ Eq. ou energia requerida, gerado nas etapas de ACV a partir da avaliação de diferentes materiais, a verificação do efeito da sucção nesses solos é fundamental para se garantir a eficiência dos projetos de pavimentação. Diante disso, é crucial destacar a necessidade de considerar a sucção como um fator crítico na avaliação da estabilidade do subleito e, conseqüentemente, na determinação da qualidade e durabilidade da rodovia. O indicador de desempenho ambiental proposto representa a quantidade de consumo energético ou CO₂ Eq. produzida por km de rodovia, dividido pela vida útil do pavimento em anos com relação à sucção do solo, dividida em três categorias: ramo seco, ramo úmido e ótimo.

4.8 Análise de sensibilidade

Em um esforço para se demonstrar a sensibilidade que os estudos de ACV, aplicados à pavimentação, podem apresentar, esse estudo avaliou: (1) a variação dos critérios de dimensionamento; (2) os distintos materiais para a camada de subleito; e (3) os impactos ambientais gerados por essas infraestruturas.

O *software* SimaPro 9.4.0.2 disponibiliza as avaliações dos impactos ambientais de cada insumo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) através do indicador GWP₁₀₀. Com base nesses resultados, classifica-se os insumos em categorias, visando a separação dos elementos de maior relevância em termos de impacto ambiental. Essa classificação busca examinar o nível de emissões de gases de efeito estufa associado a esses insumos, e em relação aos critérios de dimensionamento por meio da variação da área trincada.

4.9 Análise de incerteza

O SimaPro 9.4.0.2 oferece suporte para a análise de incerteza usando a técnica de Monte Carlo. Nesse sentido, os parâmetros e dados incertos são tratados como variáveis aleatórias, sendo que múltiplas simulações são realizadas, e cada uma com valores diferentes dessas variáveis dentro de suas distribuições de probabilidade. Com base nas simulações, é possível obter distribuições de probabilidade para os resultados, tais como as emissões de gases de efeito estufa ou outras métricas ambientais (SIMAPRO, 2023a).

O processo de análise de incerteza no SimaPro 9.4.0.2 geralmente envolve as seguintes etapas:

- Configuração da simulação de Monte Carlo: O usuário define o número de interações que a simulação de Monte Carlo executará. Um maior número de iterações resultará em resultados mais precisos, mas também aumentará o tempo de processamento.
- Execução da simulação: O SimaPro executa as simulações, alterando os parâmetros incertos a cada iteração, e registrando os resultados para cada cenário simulado.
- Análise dos resultados: Após a conclusão das simulações, o SimaPro fornece um conjunto de resultados em formato de distribuição de probabilidade para as métricas de interesse, como as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de energia, dentre outros. Essas distribuições de probabilidade permitem visualizar a variabilidade dos resultados, e fornecem informações sobre a probabilidade de diferentes intervalos de valores.

Logo, o SimaPro avalia a incerteza dos resultados usando várias métricas estatísticas, incluindo a média, a mediana, o desvio padrão (SD), o coeficiente de variação de Pearson (CV), a distribuição normal e o erro padrão da média (SEM - *Standard Error of the Mean*). Essas métricas ajudam a compreender a variabilidade dos dados e a incerteza associada às estimativas obtidas durante a análise. Além disso, essa abordagem proporciona uma visão mais robusta e abrangente dos impactos ambientais gerados, levando-se em consideração a incerteza inerente aos dados e modelos utilizados.

5. ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será apresentado a aplicação do método proposto no capítulo 4, por meio do qual iremos avaliar o impacto ambiental de pavimentos rodoviários com revestimentos asfálticos, levando-se em consideração o efeito do comportamento hidromecânico dos subleitos. Para verificação do comportamento hidromecânico, avaliou-se os efeitos da sucção e do módulo resiliente dos subleitos em diferentes umidades e critérios de dimensionamento mecanístico-empírico, utilizando o *software* MeDiNa.

Além disso, serão comparados diferentes cenários de projetos de pavimentos, levando-se em conta parâmetros como espessura de camadas, variação da área trincada, tipo de material para o subleito, sucção e módulo resiliente dos solos (tópico 10 do APÊNDICE A). Na avaliação do impacto ambiental, como delimitação do escopo, considerou-se as fases de extração e produção dos insumos necessários à implantação da rodovia idealizada para cada pavimento, usinagem, bem como a própria etapa de construção considerando-se a operação dos equipamentos de engenharia.

Os resultados obtidos poderão fornecer subsídios para a escolha de alternativas mais sustentáveis e com menor impacto ambiental na construção e operação de rodovias. Por fim, a ACV estreita seu foco nas contribuições para as alterações climáticas, e nas demandas energéticas. Como complemento, realizou-se a análise de sensibilidade e incerteza.

5.2 Exposição dos dados

Foram avaliados três materiais distintos para a camada de subleito que tinham em comum os materiais do revestimento, da base e da sub-base. Além disso, as espessuras da base e da sub-base eram fixas em 15 e 30 centímetros, respectivamente. Sendo assim, a única camada livre para variar sua espessura no processo de dimensionamento era a camada de revestimento, conforme ilustra a Figura 1.

Os solos empregados na camada de subleito deste estudo foram coletados nas proximidades da rodovia BR-040, na cidade do Rio de Janeiro (RJ). O Solo 1 foi obtido no quilômetro 16, o Solo 2 no quilômetro 20, e o Solo 3 no quilômetro 22. Contudo, os

materiais empregados nas camadas de revestimento, base e sub-base foram extraídos do próprio banco de dados do *software* Medina. As propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabelas I, II e III, do ANEXO I.

Os materiais das camadas do pavimento podem ser considerados elásticos lineares ou não lineares de acordo com os modelos constituintes do comportamento resiliente das constantes do modelo utilizado. Em relação à análise do módulo resiliente, considerou-se elástico linear ou resiliente linear para a camada asfáltica. Já para as outras camadas, utilizou-se o modelo composto, e considerou-se as interações elásticas não-lineares, ou seja, o módulo resiliente é variável dentro da espessura da própria camada.

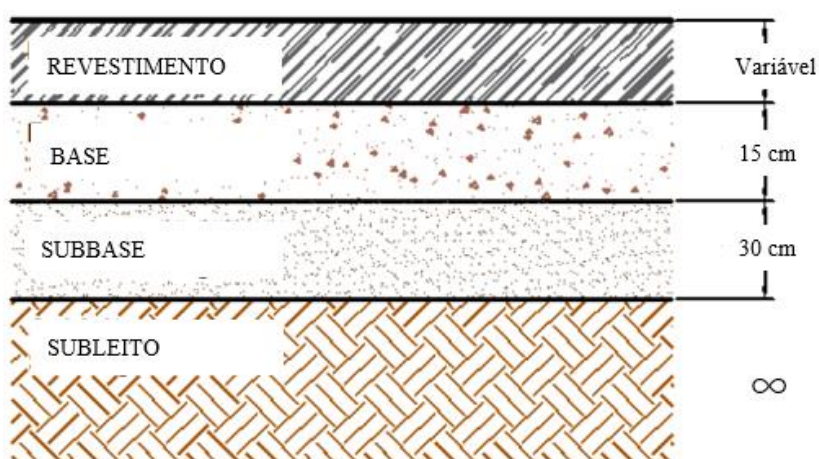


Figura 5.1 – Ilustração das camadas dos pavimentos asfálticos conforme o método de dimensionamento.

A critério de pesquisa, foram testados diferentes tipos de espessuras para a camada asfáltica, arredondadas de $\frac{1}{2}$ cm a $\frac{1}{2}$ cm (de meio centímetro a meio centímetro), a fim de atender aos valores de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de área trincada (%AT) (APÊNDICE A, Tabela A.6). Diante disso, neste estudo, foram desenvolvidos 15 cenários, com cada grupo contendo 5 cenários correspondentes a cada material de subleito investigado na umidade ótima. Esses cenários variaram a porcentagem de área trincada (AT) em 20%, 25%, 30%, 35% e 40%, para cada Solo: 1, 2 e 3 (M1, M2 e M3).

A ampliação da abordagem do estudo ocorreu ao modificar a umidade dos materiais que constituem o subleito. Isso permitiu a avaliação do comportamento hidromecânico em condições de umidade ótima, seca, úmida 1 e úmida 2, resultando na análise de 60 pavimentos. Nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3., são apresentados os diferentes cenários de áreas trincadas (AT) e as configurações de materiais em diversas condições

de umidade, as quais foram analisados para cada pavimento, considerando-se o subleito do tipo Solo 1 (M1), Solo 2 (M2) e Solo (M3).

- a) Cenários: Indica o número de cada cenário avaliado. Cada cenário representa uma variação específica nas áreas trincadas e nas condições de umidade;
- b) AT (%): Refere-se à porcentagem da área trincada (AT) no subleito que foi considerada para cada cenário. Essa porcentagem varia entre 20% e 40%, representando diferentes graus de trincamento no pavimento;
- c) Mwot: Indica um pavimento construído com o subleito em sua umidade ótima (wot);
- d) Mws: Representa um pavimento construído com o subleito em condição no ramo seco (ws), ou seja, com uma umidade mais baixa que a ótima;
- e) Mw1: Refere-se a um pavimento construído com o subleito em uma condição no ramo úmido 1 (w1), indicando uma umidade maior que a ótima, porém não tão elevada quanto nas próximas condições;
- f) Mw2: Indica um pavimento construído com o subleito em uma condição no ramo úmido 2 (w2), que representa determinada umidade mais alta do que a do estado úmido 1.

Cada cenário avaliado combina uma das configurações acima com uma determinada porcentagem de área trincada. Desse modo, este estudo possibilita a análise de diversos pavimentos com diferentes combinações de umidade e áreas trincadas do subleito, visando compreender melhor o comportamento hidromecânico em várias condições possíveis.

Tabela 5.1 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 1.

Solo 1 (M1)					
Cenários	AT (%)	¹ M1wot	² M1ws	³ M1w1	⁴ M1w2
Cenário 1	20	M1wot - Pav. 1	M1ws - Pav. 6	M1w1 - Pav. 11	M1w2 - Pav. 16
Cenário 2	25	M1wot - Pav. 2	M1ws - Pav. 7	M1w1 - Pav. 12	M1w2 - Pav. 17
Cenário 3	30	M1wot - Pav. 3	M1ws - Pav. 8	M1w1 - Pav. 13	M1w2 - Pav. 18
Cenário 4	35	M1wot - Pav. 4	M1ws - Pav. 9	M1w1 - Pav. 14	M1w2 - Pav. 19
Cenário 5	40	M1wot - Pav. 5	M1ws - Pav. 10	M1w1 - Pav. 15	M1w2 - Pav. 20

¹M1wot: pavimento com subleito na umidade ótima; ²M1ws: pavimento com subleito no ramo seco; ³M1w1: pavimento com subleito no ramo úmido 1; ⁴M1w2: pavimento com subleito no ramo úmido 2.

Tabela 5.2 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 2.

Solo 2 (M2)					
Cenários	AT (%)	¹ M2wot	² M2ws	³ M2w1	⁴ M2w2
Cenário 6	20	M2wot - Pav. 21	M2ws - Pav. 26	M2w1 - Pav. 31	M2w2 - Pav. 36
Cenário 7	25	M2wot - Pav. 22	M2ws - Pav. 27	M2w1 - Pav. 32	M2w2 - Pav. 37
Cenário 8	30	M2wot - Pav. 23	M2ws - Pav. 28	M2w1 - Pav. 33	M2w2 - Pav. 38
Cenário 9	35	M2wot - Pav. 24	M2ws - Pav. 29	M2w1 - Pav. 34	M2w2 - Pav. 39
Cenário 10	40	M2wot - Pav. 25	M2ws - Pav. 30	M2w1 - Pav. 35	M2w2 - Pav. 40

¹M2wot: pavimento com subleito na umidade ótima; ²M2ws: pavimento com subleito no ramo seco; ³M2ws: pavimento com subleito no ramo úmido 1; ⁴M2ws: pavimento com subleito no ramo úmido 2.

Tabela 5.3 – Cenários das áreas trincadas e configurações de materiais em umidades distintas analisados para cada pavimento – Solo 3.

Solo 3 (M3)					
Cenários	AT (%)	M3wot	M3ws	M3w1	M3w2
Cenário 11	20	M3wot - Pav. 41	M3ws - Pav. 46	M3w1 - Pav. 51	M3w2 - Pav. 56
Cenário 12	25	M3wot - Pav. 42	M3ws - Pav. 47	M3w1 - Pav. 52	M3w2 - Pav. 57
Cenário 13	30	M3wot - Pav. 43	M3ws - Pav. 48	M3w1 - Pav. 53	M3w2 - Pav. 58
Cenário 14	35	M3wot - Pav. 44	M3ws - Pav. 49	M3w1 - Pav. 54	M3w2 - Pav. 59
Cenário 15	40	M3wot - Pav. 45	M3ws - Pav. 50	M3w1 - Pav. 55	M3w2 - Pav. 60

¹M3wot: pavimento com subleito na umidade ótima; ²M3ws: pavimento com subleito no ramo seco; ³M3ws: pavimento com subleito no ramo úmido 1; ⁴M3ws: pavimento com subleito no ramo úmido 2.

Para a determinação do tipo de via, de acordo com o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais DNER (1999), que leva em consideração as características de projeto, a classificação adotada é Classe I – B. As características das classes de projeto de rodovia estão expostas no ANEXO I, Tabelas IV, V e VI. Desse modo, neste estudo utilizou-se o pavimento de pista simples com largura da plataforma de 3,60 metros e sem acostamento, essa delimitação hipotética foi idealizada para fins acadêmicos. A representação da estrutura da plataforma pode ser visualizada pela Figura 5.2.

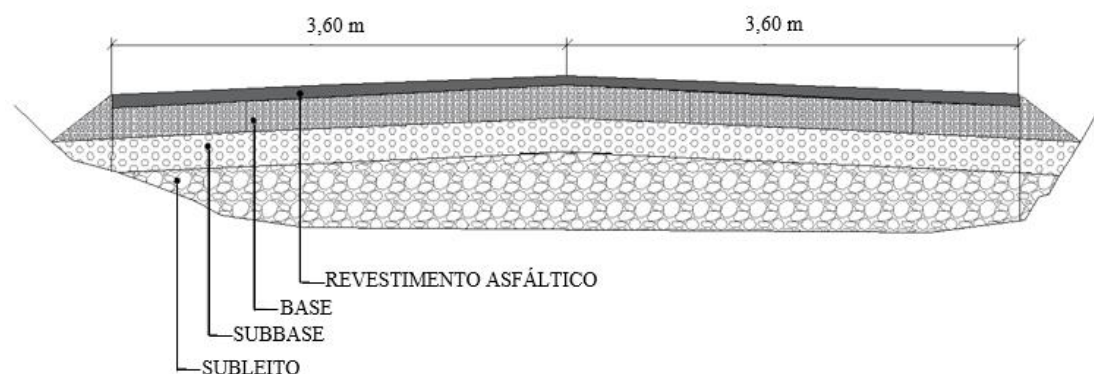


Figura 5.2 - Plataforma do pavimento asfáltico.

Na determinação dos dados do tráfego, considerou-se uma via de Sistema Arterial Primário, apresentando-se, de acordo com o DNIT (2006) e adotado pelo MeDiNa (DNIT, 2020), uma confiabilidade de 85% e área trincada de 30% (critério mínimo de desempenho adotado pelo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos rodoviários). Assim, o volume médio diário no ano de abertura do tráfego (VMD 1ºano) foi, de acordo com o tipo de via, de 1500 automóveis, não havendo acréscimos durante o decorrer do tempo pelo fato de ter sido considerada a taxa de crescimento de 0%, cujos valores foram fixados durante toda a pesquisa.

Por fim temos o fator de veículo (FV). A partir desse valor, o programa consegue, juntamente com o VMD, calcular automaticamente o “Número Equivalente de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário (N)”. Considerou-se um FV igual a 1, sendo essa uma configuração de eixo simples de roda dupla com carga de 8,20 toneladas. O *software* MeDiNa possui vários tipos de configurações de eixos e suas características especificadas, e todos esses valores já são pré-determinados pelo próprio programa quando inicializado. Além disso, 100% dos veículos estão na faixa de tráfego de projeto pelo fato de não extrapolar o número de duas faixas de rolamento na via e, assim, o tráfego não se divide para outras faixas. Portanto, para um período de projetos de 10 anos (120 meses), o número total de passagens (N Total) será o VMD multiplicado por FV, igual a N de $5,48 \times 10^6$ eixos-padrão.

Para cada simulação, o *software* retorna na aba “Resultados” um relatório detalhado a respeito da evolução dos danos mensais para aquela análise, sendo possível uma avaliação da vida útil do pavimento em relação ao tipo de subleito empregado e o valor da espessura dimensionada. Dessa forma, os dados de propriedades mecânicas de cada solo foram inseridos no *software* brasileiro de dimensionamento (MeDiNa), os quais possuem atributos diferentes entre si, trazendo à pesquisa uma gama maior de possibilidades na intenção de demonstrar as diferenças acarretadas no valor da espessura, área trincada e vida útil.

De posse das espessuras das camadas, utilizou-se a tabela do Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO 3 (2023) do Estado do Rio de Janeiro, referente ao mês de janeiro de 2023 (Tabela 5.4). Adotou-se essa abordagem para fornecer suporte na elaboração do inventário da ACV. A consulta na tabela do SICRO 3 (2023) se dá pela análise dos materiais utilizados no projeto e o levantamento do inventário. Os cálculos do

quantitativo de materiais para 1 km de via foram realizados considerando-se a via de pista simples e sem acostamento.

Tabela 5.4 – Materiais e serviços para construção do pavimento.

CAMADA	DESCRIÇÃO	SICRO
Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	4011463
Imprimação	Imprimação com asfalto diluído	4011351
Base	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.	4011256
Sub-base	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	4011227
Subleito	Subleito com material local (adaptado)	4011211

Fonte: adaptado de SICRO 3 (2023).

Portanto, a partir dos dados coletados, é possível delinear tanto o escopo quanto os limites do estudo, ao mesmo tempo em que se estabelece o propósito e a perspectiva da análise, garantindo a relevância e comparabilidade dos resultados obtidos. A definição da Unidade Funcional desempenha um papel fundamental nesse processo, assegurando a consistência na condução da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e a interpretação adequada dos resultados. Neste estudo, a Unidade Funcional adotada é “km de via construído”.

Quanto à etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), os dados referentes à energia primária e às emissões de gases do efeito estufa foram processados com o auxílio do *software* SimaPro 9.4.0.2, usando o método de análise de impacto de ciclo de vida CML e o banco de dados Ecoinvent. Para aferir o potencial de impactos atmosféricos dos cenários estudados, considerando os pavimentos analisados sob a influência do comportamento hidromecânico, foram escolhidos cinco indicadores de alterações climáticas - GWP₁₀₀: CO₂ Eq (em kg.), energia bruta consumida (em MJ), emissões de dióxido de carbono (em toneladas), dióxido de nitrogênio (em kg) e metano (em kg). Assim, é possível calcular razões entre suas previsões de emissões, consumos energéticos e vidas úteis, o que possibilita estimar a unidade funcional

5.3 Resultados e discussões

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos por meio da metodologia descrita no Capítulo 4, referente à avaliação do impacto hidromecânico de subleitos em pavimentos rodoviários com revestimentos asfálticos, e a sua influência na

Análise de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados incluem a quantidade de gases do efeito estufa (GEE) emitidos e a quantidade de energia primária consumida em cada cenário estudado. Também serão apresentados os dados relacionados à sucção e módulo resiliente (M_R) dos solos utilizados na simulação dos cenários. A análise dos resultados visa avaliar as possíveis implicações desses parâmetros na escolha de materiais e na definição de estratégias para a redução do impacto ambiental dessas infraestruturas. Realizou-se a análise de sensibilidade avaliando-se a influência da porcentagem de área trincada nos pavimentos, e a análise de incerteza por meio do *software* SimaPro 9.4.0.2, utilizando-se a técnica de Monte Carlo.

5.3.1 Ensaios laboratoriais

a) Caracterização física dos materiais para o subleito

A Figura 5.3 apresenta a distribuição granulométrica dos materiais de solos que compõe o subleito dos pavimentos rodoviários deste estudo. Na Figura 5.4, evidencia-se, em porcentagem, a distribuições dos grãos de acordo com cada categoria, sendo os valores, respectivamente: solo 1: 1,64 % de pedregulho; areia 75,34%; 3,88% de silte e 19,14% de argila; solo 2: 1,54 % de pedregulho, areia 63,94%; 9,90% de silte e 24,62% de argila e solo 3: 0,97 % de pedregulho, areia 64,18%; 11,96% de silte e 22,89% de argila.

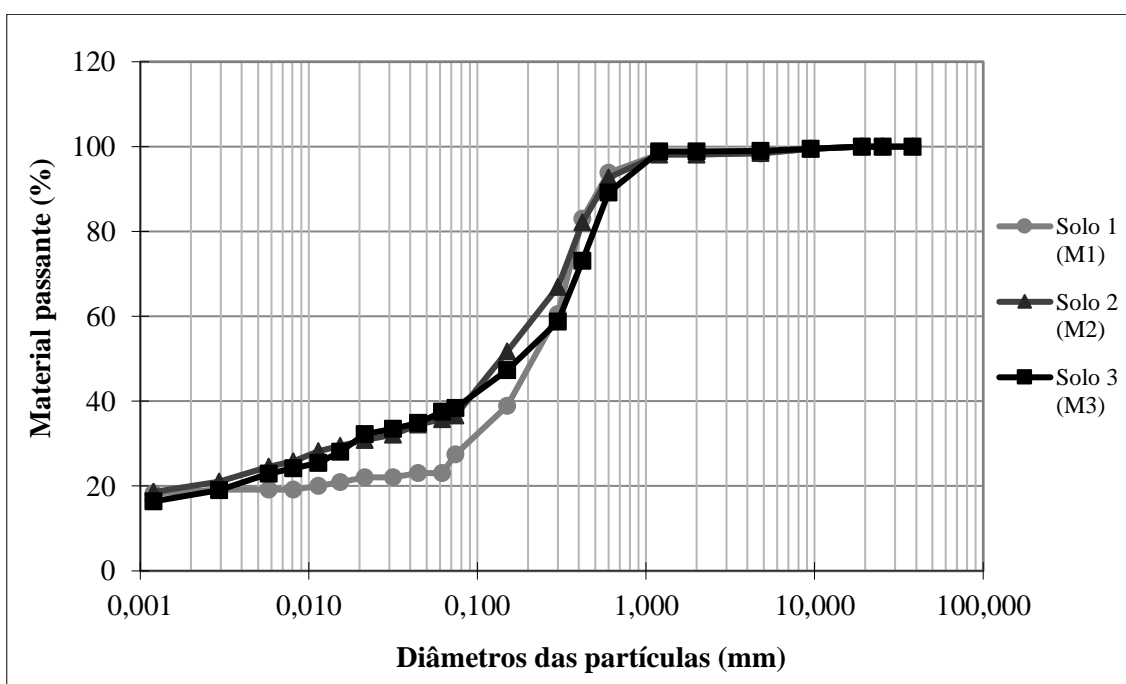


Figura 5.3 – Curva granulométrica dos solos para o subleito.

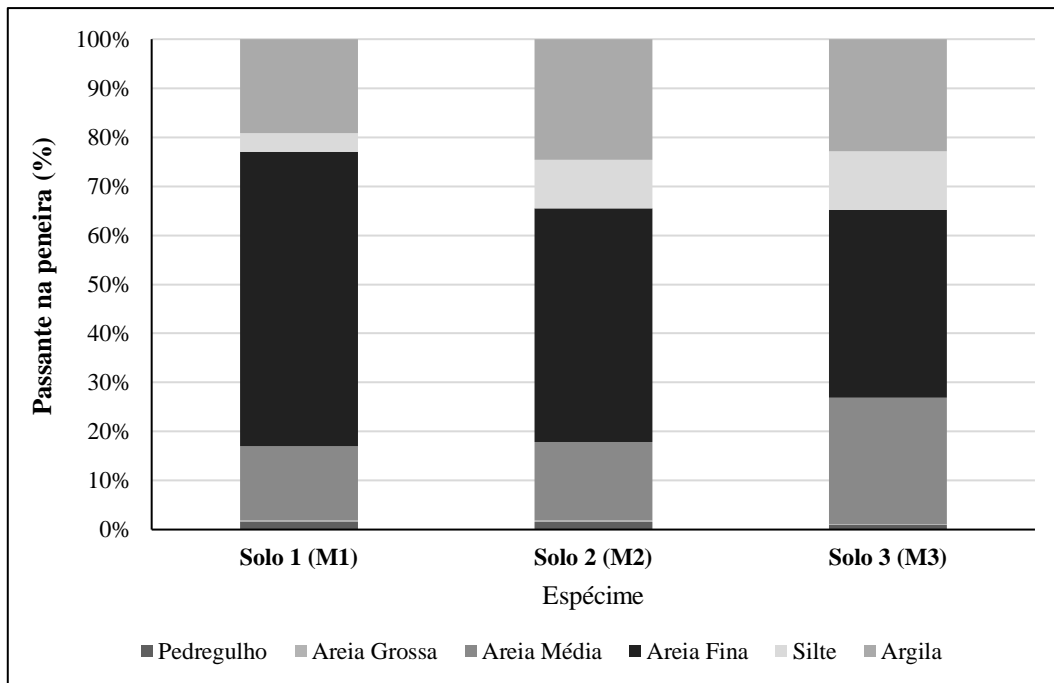


Figura 5.4 – Composição granulométrica dos solos para o subleito.

Em relação ao resultado dos ensaios de compactação realizados para uma energia de compactação *Proctor* Normal do solo 1 (M1), solo 2 (M2) e solo 3 (M3), foram obtidos valores de massa específica aparente seca, e umidade ótima de 1,713 g/cm³ e 21,15%, 1,670 g/cm³ e 22,73%, 1,711 g/cm³ e 21,08%, respectivamente, conforme apresentados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

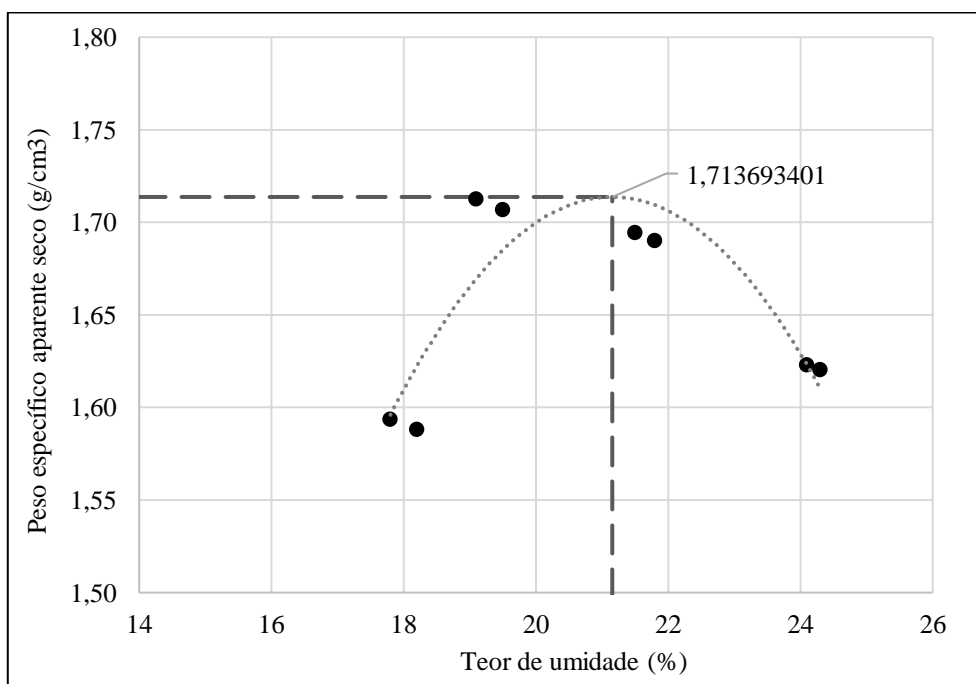


Figura 5.5 – Curva de Compactação – solo 1.

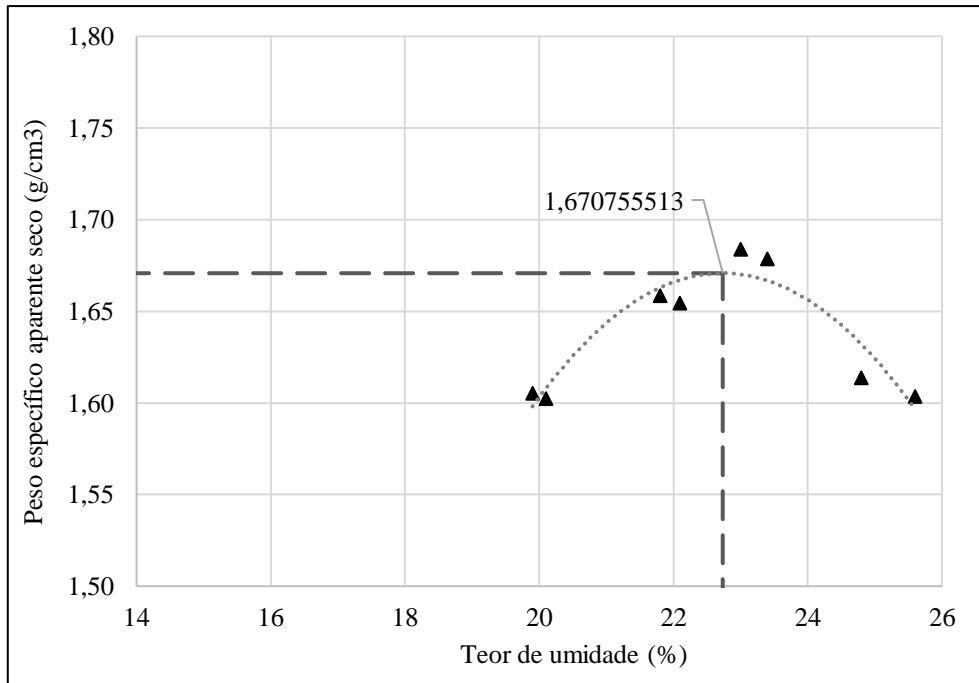


Figura 5.6 – Curva de Compactação – solo 2.

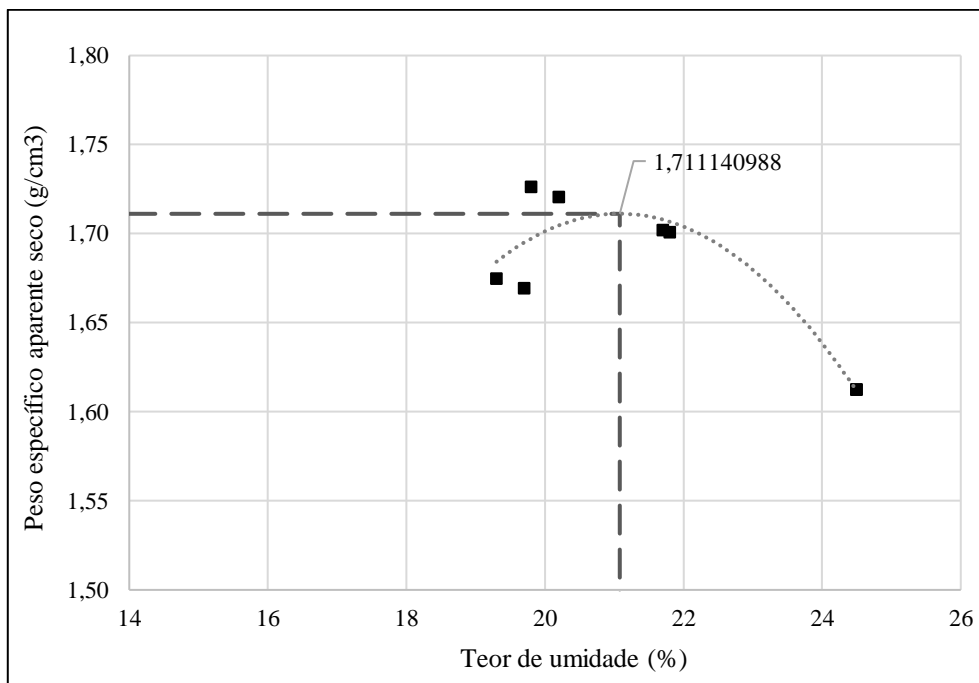


Figura 5.7 – Curva de Compactação – solo 3.

No que se refere à classificação das amostras de solo, inicialmente realizou-se os ensaios dos índices de consistência, ou seja, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme demonstrado nos resultados da Tabela 5.5. A partir dos resultados de granulometria e índices de consistência do solo 1 (M1), solo 2 (M2) e solo 3 (M3), os mesmos foram classificados de acordo com a SUCS (Sistema Unificado de

Classificação dos Solos) ou USCS (*Unified Soil Classification System*), como areia argilosa, mistura de areia e argila [(SC: S= Sand (areia) C= Clay (com argila)]. De acordo com a classificação SUCS, solos com valores de Índice de Plasticidade (IP) acima de 7 são considerados materiais com alta plasticidade. Sendo assim, os solos estudados possuem plasticidade elevada.

Tabela 5.5 – Classificação dos materiais do subleito – SUCS.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)	P#200⁽¹⁾ (%)	P#4⁽²⁾ (%)	SUCS
Solo 1 (M1)	42,32	34,73	7,59	27,43	98,36	SC
Solo 2 (M2)	43,35	32,41	10,94	36,63	98,46	SC
Solo 3 (M3)	44,91	29,73	15,18	38,45	99,03	SC

Nota: ⁽¹⁾P#200 (peneira n° 200 - 0,074 mm); ⁽²⁾P#4 (peneira n° 4 - 4,80 mm);

De acordo com Bueno e Vilar (1980), solos classificados pela SUCS com características SC possuem baixa permeabilidade e boa trabalhabilidade com a aplicação de material na construção de estradas. Em relação à massa específica aparente seca na umidade ótima, quando compactado no *Proctor Normal*, possuem variação de 1,68 a 2,00 g/cm³, sendo assim, observa-se que os resultados obtidos dos solo 1 (M1), solo 2 (M2) e solo 3 (M3) são enquadrados dentro dessa equivalência. Ainda segundo os autores, quando este material é compactado e saturado, a resistência é considerada de regular a boa.

Os solos foram classificados quanto a HRB (*Highway Research Board*) através da análise da granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade e o índice de grupo (IG), conforme demonstrado nos resultados da Tabela 5.6. De acordo com DER/SP (2012), no geral, solos com IG próximo ao valor de 0 tendem a serem ótimos materiais para aplicação em subleito. A amostra de solo 1 (M1) tem a classificação enquadrada como A-2-5, a qual apresenta o comportamento com alta plasticidade e baixa compressibilidade. Isso significa que ele tende a ter alta retração e fissuramento quando submetido à secagem, e à expansão quando submetido à absorção de água. Além disso, como é um solo de alta plasticidade, pode apresentar deformação plástica significativa sob carga. O IG deste solo é igual a zero.

As amostras com solo 1 (M1) e solo 2 (M2) são materiais enquadrados A-7-5 e A-7-6, e possuem como características elevada compressibilidade, alta sensibilidade à

água e baixa resistência ao cisalhamento. Ambos os solos são compostos principalmente de argila, com pequena quantidade de silte e areia. O IG é 1 e 2, respectivamente, que indica que possui baixa capacidade de suporte, e é altamente compressível. Esse tipo de material apresenta alto teor de umidade.

Tabela 5.6 – Classificação dos materiais do subleito – HRB.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)	P#200 ⁽¹⁾ (%)	P#40 ⁽²⁾ (%)	P#10 ⁽³⁾ (%)	IG	HRB
Solo 1 (M1)	42,32	34,73	7,59	27,43	82,99	98,1754	0	A-2-5
Solo 2 (M2)	43,35	32,41	10,94	36,63	82,17	98,0983	1	A-7-5/A-7-6
Solo 3 (M3)	44,91	29,73	15,18	38,45	73,15	98,8957	2	A-7-5/A-7-6

Nota: ⁽¹⁾P#200 (peneira n° 200 - 0,074 mm); ⁽²⁾P#40 (peneira n° 40 - 0,42 mm); ⁽³⁾P#10 (peneira n° 10 - 2,00 mm);

Os sistemas de classificações tradicionais como o SUCS e HRB não são eficientes para a classificação dos solos tropicais quanto à sua viabilidade mecânica, uma vez que ambas as metodologias são baseadas nos limites de Atterberg (LL e IP) e granulometria. De acordo com Nogami e Villibor (1983), os sistemas tradicionais têm-se apresentado inadequados para a classificação dos solos lateríticos e saprolíticos, pois não permitem distingui-los. Sendo assim, os sistemas SUCS e HRB, originários de países temperados, foram desenvolvidos para solos encontrados nestas regiões, não sendo adaptados para solos tropicais.

Os solos encontrados no Brasil e em outras regiões tropicais possuem características diferentes quando comparados a solos de regiões de clima temperado (GUIMARÃES, MOTTA e CASTRO, 2019; FREITAS, REZENDE e GITARANA JR., 2020; SILVA *et al.*, 2021). Existe uma série de discussões a respeito dos procedimentos tradicionais de classificação, baseados na granulometria e nos Limites de Atterberg, sobre os quais considera-se não serem capazes de abranger as características peculiares apresentadas pelos solos formados em regiões tropicais. Diante disso, torna-se necessária a inserção da classificação MCT (miniatura, compactada, tropical), caracterizada por ser a classificação geotécnica mais adequada a esses tipos de solos.

Segundo Balbo (2007), O MCT foi elaborado para avaliar e classificar solos finos tropicais, tendo em vista as suas propriedades mecânicas e hidráulicas quando compactados, e a verificação para a sua aplicação em pavimentação. Desse modo, a Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos pela classificação MCT. Para Villibor e Nogami (2009), os solos classificados como LA' apresentam valor de c' entre 0,7 e 1,5,

com índice de laterização e' de 0,6 a 1,15, sendo aqueles com valores mais próximos de 0,6 melhores. Os solos classificados como NG' apresentam valor de c' entre 1,5 ou 1,7 a 3,0 com índice de laterização e' de 1,15 a 2,2. Já os solos classificados como LG', apresenta c' entre 1,5 a 3,0; com índice de laterização e' de 0,6 a 1,15. As três amostras de solos apresentaram comportamento LA' (solo arenoso laterítico); NG' (solo argiloso não laterítico) e LG' (solo argiloso laterítico).

Tabela 5.7 – Classificação dos materiais do subleito – MCT.

Material	e' ⁽¹⁾	c' ⁽²⁾	MCT
Solo 1 (M1)	1,1136	1,3290	LA' ⁽³⁾
Solo 2 (M2)	1,2785	1,8030	NG' ⁽⁴⁾
Solo 3 (M3)	1,1375	1,8030	LG' ⁽⁵⁾

Nota: ⁽¹⁾ e' : índice de laterização; ⁽²⁾ c' : coeficiente que correlaciona com a granulometria; ⁽³⁾ LA': Solo arenoso laterítico
⁽⁴⁾ NG': Solo argiloso não laterítico ⁽⁵⁾ LG': Solo argiloso laterítico.

De acordo com o DNIT (2006), os solos classificados como LA' são compostos por areias argilosas e argilas arenosas, e têm baixa permeabilidade. Deste modo, possuem dificuldade em permitir a passagem da água. Além disso, apresentam média a alta plasticidade, e na presença de água apresentam baixa expansão. De modo geral, é considerado um material aplicável em pavimentos devido à natureza desses solos, pois são mais resistentes e estáveis em condições de carregamento.

Para o DNIT (2006), os solos do grupo NG' são considerados argilas, argilas arenosas e argilas siltosas. Logo, são materiais com características de média a baixa permeabilidade e apresentam alta plasticidade, e na presença de água possuem alta expansão.

Segundo Villibor e Nogami (2009), quando os solos LG' possuem predominância de areia, eles apresentam as mesmas características de solos classificados como LA'. Para os autores, os solos LG' são compostos por argilas, argila arenosa, argila siltosa e siltes argilosos, e apresentam facilidade de compactação e elevada coesão. Conforme descrito pelo DNIT (2006), esse tipo de solo tem baixa permeabilidade e apresenta média a alta plasticidade, e na presença de água possuem baixa expansão. Alguns solos deste grupo produzem elevada contração por secagem ao ar, após a compactação; e, por esse motivo, é um material suscetível a trincamentos (VILLIBOR e NOGAMI, 2009).

Por fim, embora as três classificações possam ser adotadas para solos tropicais, utilizou-se a classificação MCT para o desenvolvimento desta pesquisa.

b) Caracterização mecânica dos materiais para o subleito

Para a determinação do Módulo Resiliente (M_R) que melhor representasse a estrutura da camada de subleito, foram executadas as seguintes etapas:

1. Dimensionamento do pavimento no MeDiNa com todas as camadas.
2. Com base nos dados coletados, essas informações foram utilizadas para criar uma malha de pontos no *software* AEMC.
3. A partir desta malha de pontos, foram coletados os valores de tensão desvio e tensão confinante correspondentes ao topo do subleito.
4. Utilizando os dados de tensão confinante e tensão desvio obtidos na etapa anterior, foi realizada a comparação com os pares de tensão obtidos em ensaios triaxiais de cargas repetidas, seguindo as diretrizes da norma do DNIT (2018a).
5. Através dessa comparação, foi possível identificar o par de tensão que melhor correspondia aos valores obtidos no topo do subleito; representando, assim, a condição mais adequada para o M_R da camada de subleito.

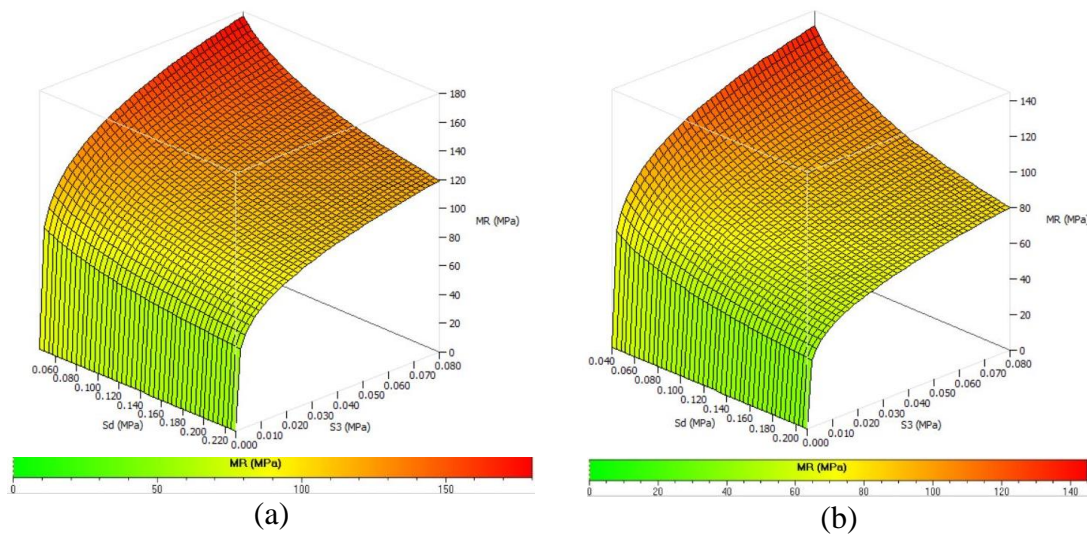
O objetivo desse processo foi identificar quais foram os pares de tensão que se aproximavam melhor dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Essas etapas descritas acima foram fundamentais para assegurar a seleção do M_R mais apropriado, garantindo-se uma estrutura de pavimento mais confiável e adequada às características específicas do subleito considerado no projeto.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados dos ensaios de M_R realizados para cada tipo de solo estudado, e a partir das diferentes variações de umidade. Em outras palavras, os cenários relacionam as distintas umidades, sendo dois no ramo úmido, um no ramo seco e outro na ótima para cada tipo de solo estudado, tendo-se os resultados em relação ao módulo resiliente, aos parâmetros de regressão, e tensões desvio e confinante.

Tabela 5.8 – Dados do ensaio mecânico dos solos e classificados de acordo com o MCT.

Cenários	Umidade (%)	Ramo	k_1	k_2	k_3	R^2	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
1	21,15	ótimo	122,439	0,160	-0,240	0,76	0,072	0,071	164,49
2	18,00	seco	67,732	0,188	-0,369	0,79	0,053	0,051	121,46
3	21,65	úmido 1	60,107	0,376	-0,302	0,89	0,053	0,051	55,57
4	24,20	úmido 2	56,716	0,348	-0,249	0,73	0,038	0,035	43,54
5	22,73	ótimo	153,970	0,323	-0,268	0,60	0,053	0,051	144,95
6	20,00	seco	123,706	0,152	-0,206	0,56	0,073	0,071	147,41
7	23,20	úmido 1	150,588	0,582	-0,273	0,90	0,073	0,071	71,57
8	25,20	úmido 2	76,155	0,386	-0,254	0,81	0,053	0,05	55,07
9	21,08	ótimo	80,888	0,232	-0,354	0,64	0,053	0,051	136,43
10	19,50	seco	354,146	0,496	-0,061	0,58	0,052	0,051	120,16
11	21,75	úmido 1	37,815	0,240	-0,457	0,88	0,053	0,051	78,34
12	24,50	úmido 2	31,656	0,212	-0,382	0,96	0,038	0,07	46,11

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos tridimensionais obtidos para o modelo composto dos solos 1, 2 e 3 na umidade ótima, no ramo seco e nos ramos úmidos. Além disso, nos gráficos a tensão desvio (σ_d) é representada por “sd” e a tensão confinante (σ_c) é simbolizada por “s3”, ambos em MPa.



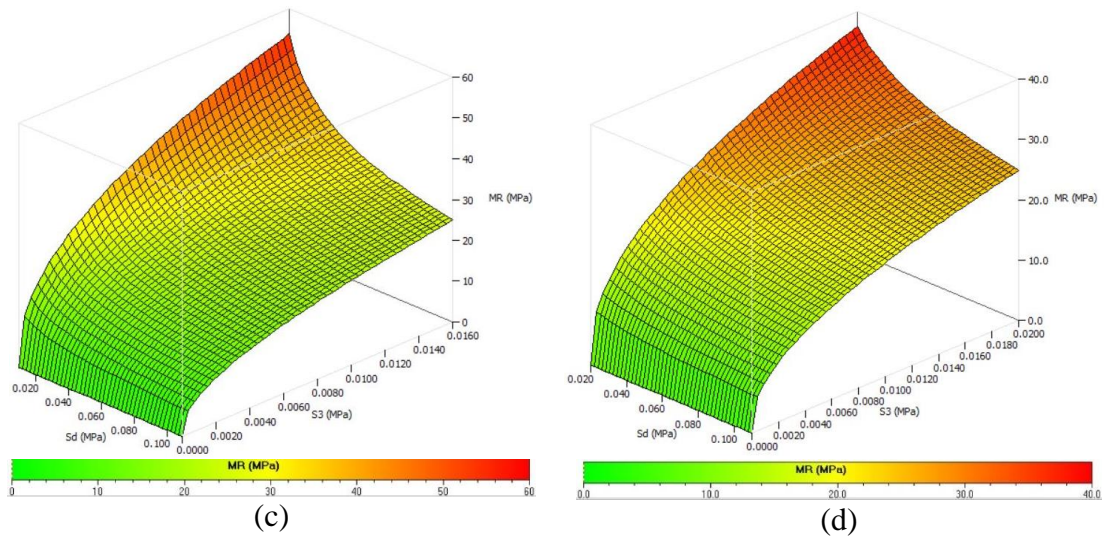


Figura 5.8 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 1 (M1): a) M1wot – ótima; b) M1ws – ramo seco; c) M1w1 – ramo úmido 1 e d) M1w2 – ramo úmido 2.

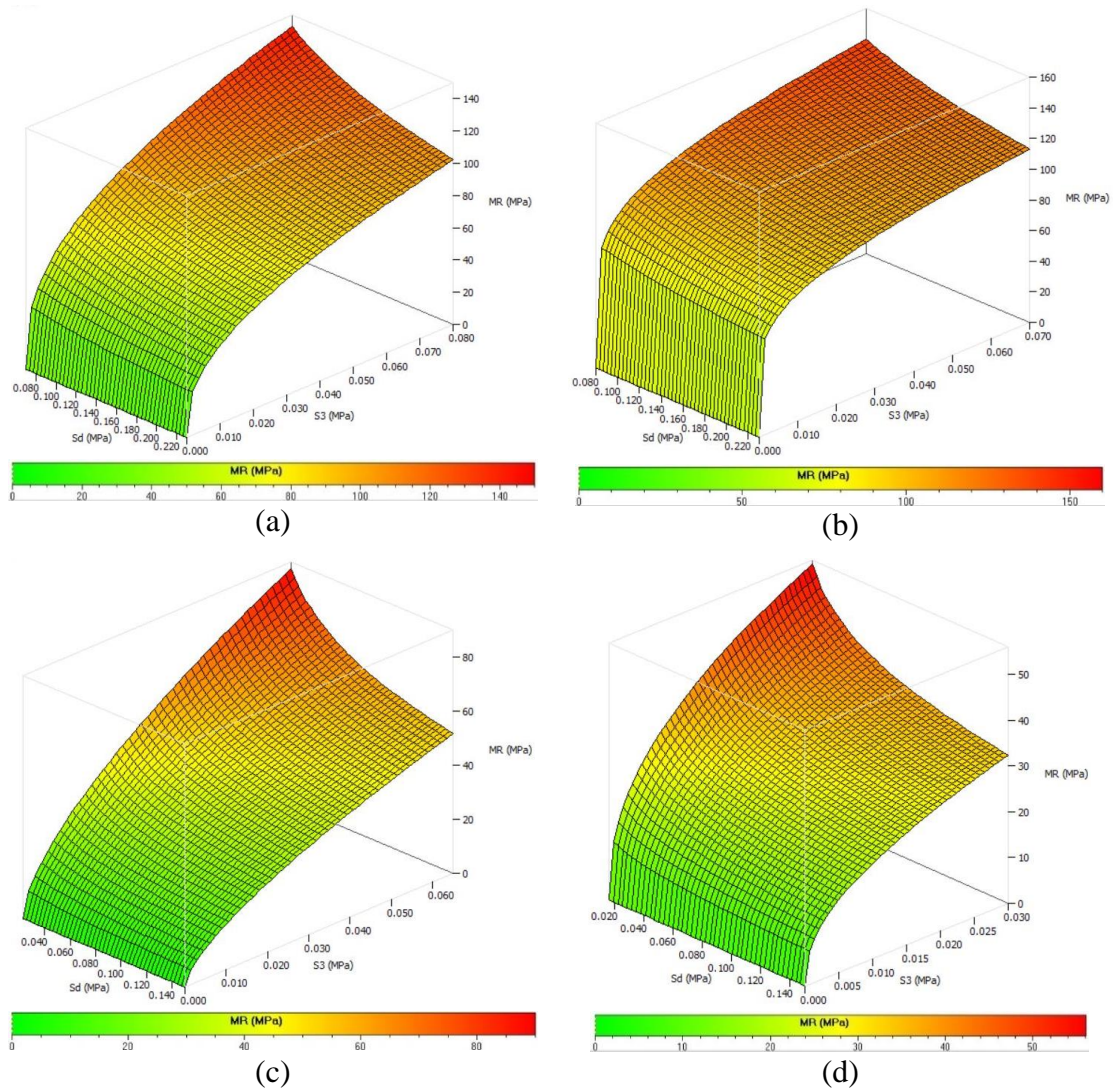


Figura 5.9 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 2 (M2): a) M2wot – ótima; b) M2ws – ramo seco; c) M2w1 – ramo úmido 1 e d) M2w2 – ramo úmido 2.

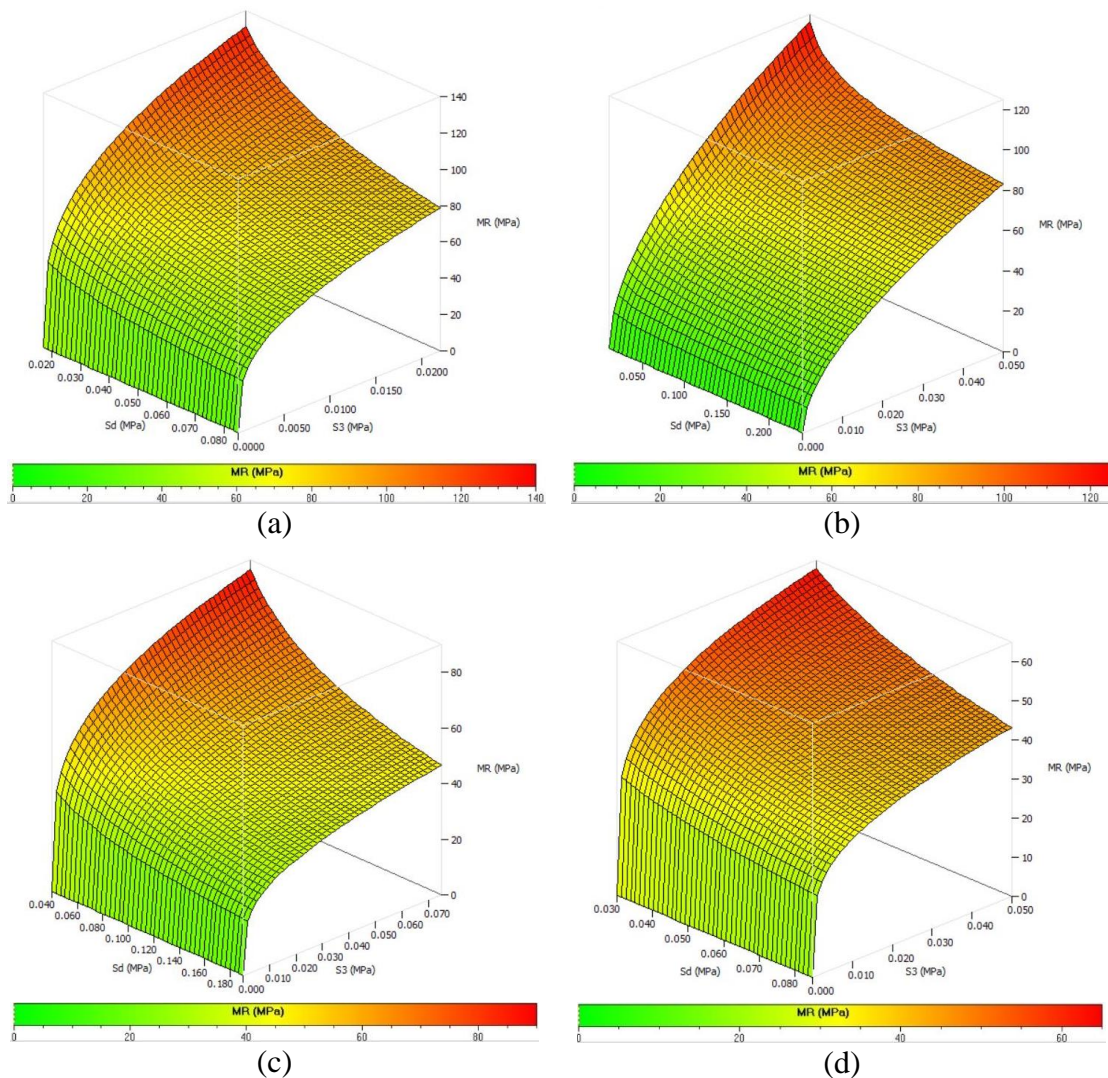


Figura 5.10 – Gráfico tridimensional do modelo composto para os cenários com o solo 3 (M3): a) M3wot – ótima; b) M3ws – ramo seco; c) M3w1 – ramo úmido 1 e d) M3w2 – ramo úmido 2.

Ao analisar os gráficos, podemos observar claramente o comportamento elástico não linear dos solos, o qual é evidenciado pela superfície irregular definida pelos módulos de resiliência em diferentes estados de tensões. Os solos M1, M2 e M3 apresentaram modelos com comportamentos semelhantes, onde os valores positivos do parâmetro k_2 indicam um aumento no módulo de resiliência com o aumento da tensão confinante. No entanto, esse efeito não ocorre com o incremento da tensão desvio diante aos valores negativos de k_3 .

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam o comportamento mecânico dos materiais estudados (M_R) em relação à umidade, e a partir de um ponto no ramo seco e ótimo, e dois pontos no ramo úmido. A linha tracejada passa pela umidade ótima e divide-se entre o ramo úmido e seco. Observa-se que o comportamento mecânico dos solos na umidade

ótima, o M1wot, teve o maior valor de M_R , e o M3wot o menor valor. Em relação ao ramo seco, o M1ws teve o maior valor de M_R , e o M3ws o menor valor. Por fim, em relação ao ramo úmido 1 e úmido 2, respectivamente, o M3w1 e M2w2, tiveram o maior valor de M_R , e o M1w1 e M1w2, o menor valor.

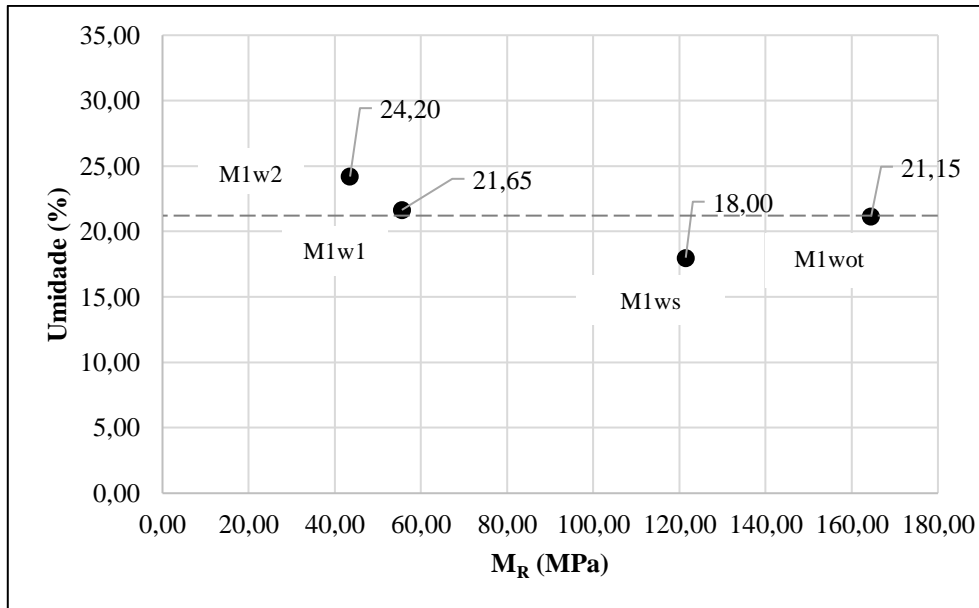


Figura 5.11 – Solo 1 (M1): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.

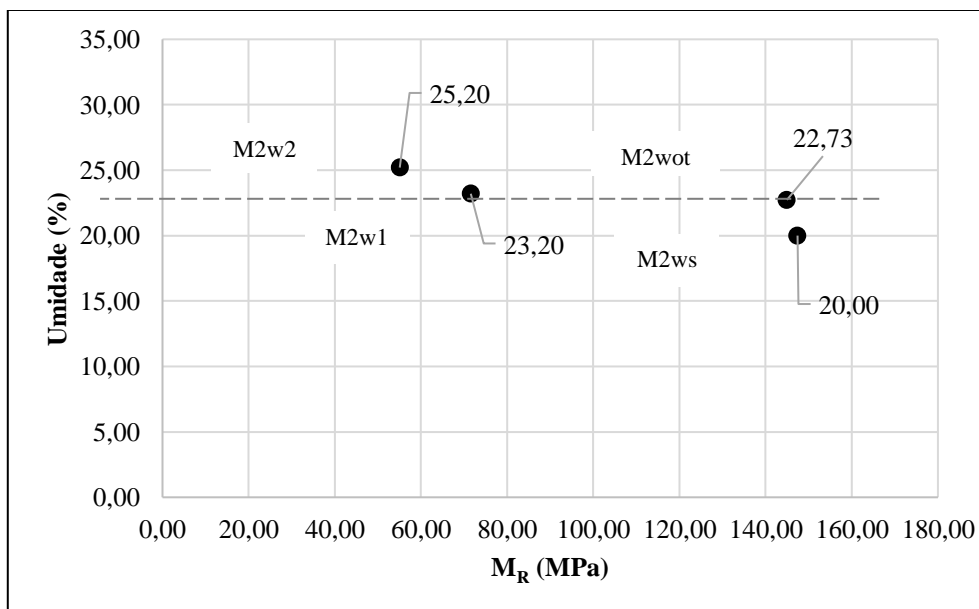


Figura 5.12 – Solo 2 (M2): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.

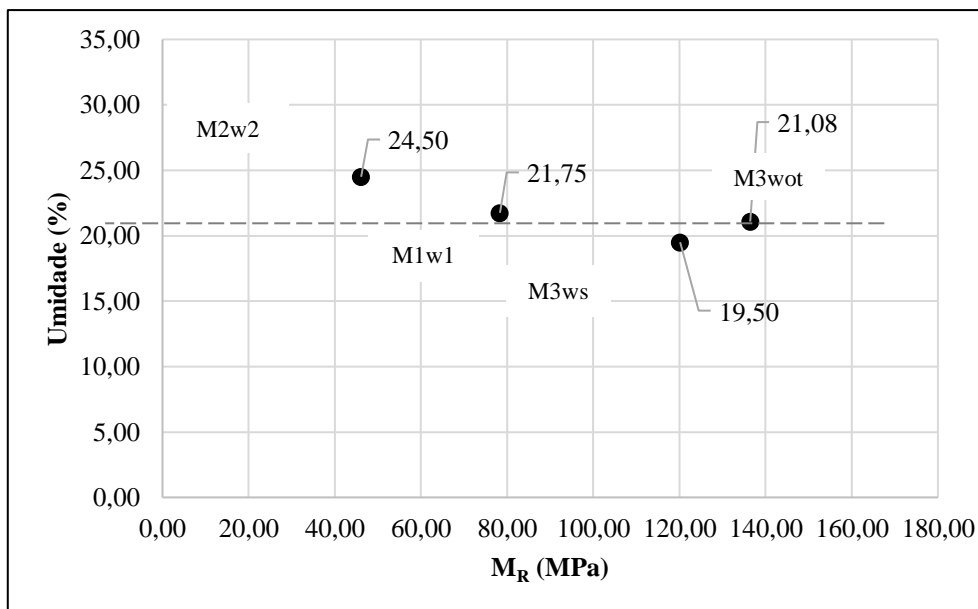


Figura 5.13 – Solo 3 (M3): umidade ótima, ramo seco, ramo úmido versus Módulo Resiliente.

Segundo Bernucci (1995), os solos lateríticos compactados na umidade ótima podem apresentar módulos de resiliência na faixa de 100 MPa a 500 MPa (equivalente a 1.000 a 5.000 kgf/cm²), ou até mesmo valores superiores, dependendo das características específicas de cada tipo de solo. No entanto, é importante ressaltarmos que solos argilosos tendem a apresentar M_R menores em comparação com os solos mais arenosos. Logo, os resultados obtidos do M_R para os cenários M1wot, M2wot e M3wot, respectivamente, são 164,49 MPa, 144,95 MPa e 136,43 MPa, respectivamente. Desse modo, os solos arenosos apresentaram M_R maior do que os solos argilosos, conforme previsto em literatura.

Já no ramo seco, os valores de M_R geralmente não apresentam grandes diferenças em relação à umidade ótima. O solo 1 (M1) e solo 2 (M2) apresentaram o M_R na umidade ótima, M1wot e M2wot, maior do que os do ramo seco, M1ws e M2ws. Ao verificar os resultados da Figura 5.12, pertencentes ao solo 3 (M3), classificado como LG', observa-se que a M_R deste material no ramo seco, M3ws, é maior do que na umidade ótima, M3wot.

Cabe ressaltarmos que os solos na umidade ótima atingem o ponto de máxima compactação e densidade. No entanto, devido a essas características podem reduzir a coesão e aumentar a compressibilidade, resultando em um módulo resiliente menor. Já no ramo seco, a umidade do solo é menor, o que pode aumentar a coesão e diminuir a compressibilidade do solo, resultando em um módulo resiliente maior.

Por sua vez, solos argilosos costumam apresentar módulos resilientes maiores no ramo úmido em relação aos demais, devido à sua elevada plasticidade. Verifica-se que os solos M2 e M3, pertencentes aos grupos dos argilosos, tiveram os M_R maiores do que o solo M1 classificado como LA'.

c) Caracterização hidráulica dos materiais do subleito

As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam as curvas características que descrevem a relação entre o teor de umidade e a sucção do solo, considerando-se diferentes tipos de solos, sendo M1, M2 e M3. Desse modo, a curva característica possibilita a análise do comportamento do solo frente a variações na umidade, uma vez que a sucção é um indicador da capacidade do solo em reter água.

Foram avaliados vários métodos de ajuste para a elaboração da curva característica, e o que se mostrou mais adequado para os dados dos materiais analisados foi o Bimodal de Van Genuchten (APÊNDICE A, Tabela A.1, equações A1 e A.2). Isso significa que esse modelo teve melhor desempenho em descrever o comportamento do solo em diferentes condições de umidade e sucção. Os valores de umidade e sucção estão representando na Tabela A.2, do APÊNDICE A. Em seguimento, com o intuito de obter os dados de sucção para os valores de umidade ótima nos ramos seco, úmido 1 e úmido 2, realizou-se a interpolação dos dados. Os resultados encontrados estão expostos nas Tabelas A.3, A.4 e A.5, do APÊNDICE A.

Ao analisar as Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, podemos constatar que a sucção das amostras de solo fornece informações sobre a capacidade do material em reter água em diferentes condições. Desse modo, verifica-se que o aumento da sucção promove uma tendência de decréscimo do teor de umidade. É importante destacarmos que a capacidade de retenção de água do solo está diretamente relacionada às características físicas do material, e essas características variam de acordo com o tipo de solo.

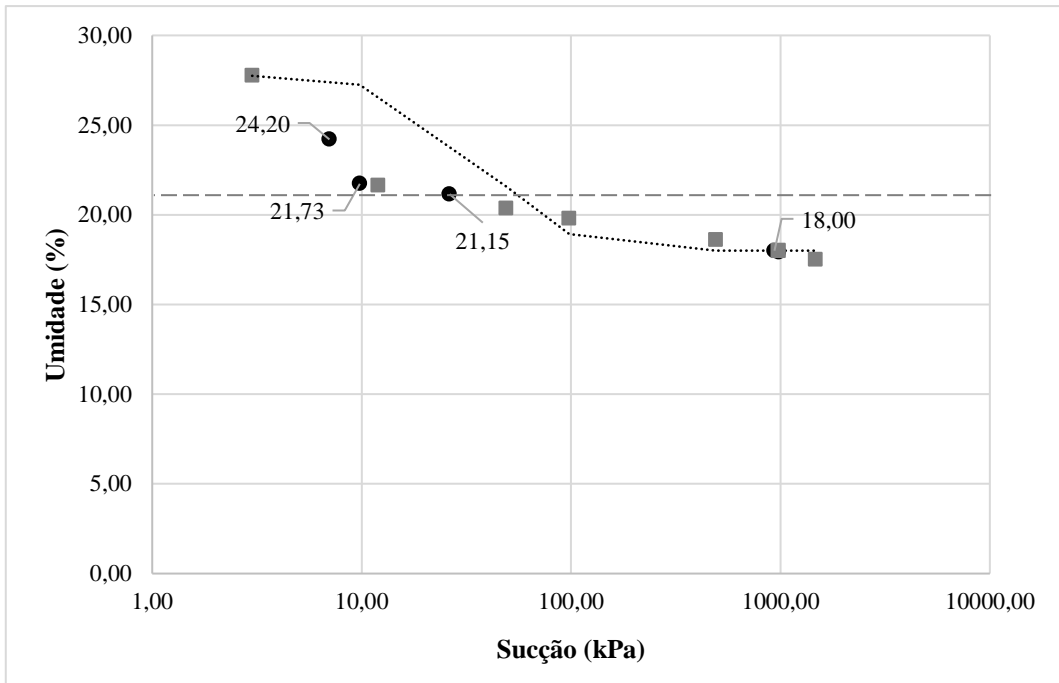


Figura 5.14 – Solo 1 (M1): Curva característica.

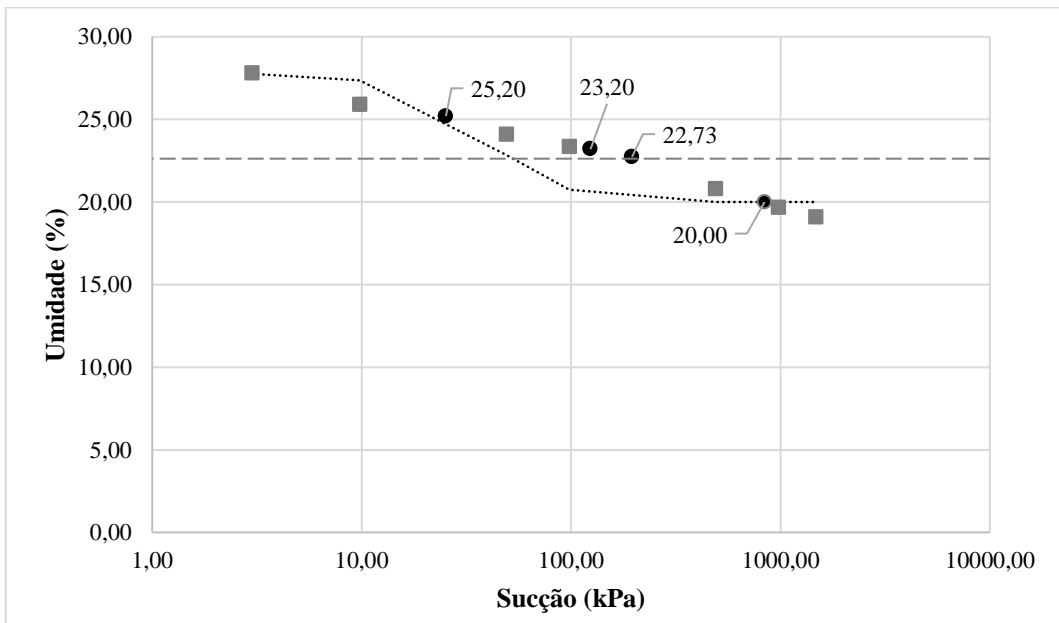


Figura 5.15 – Solo 2 (M2): Curva característica.

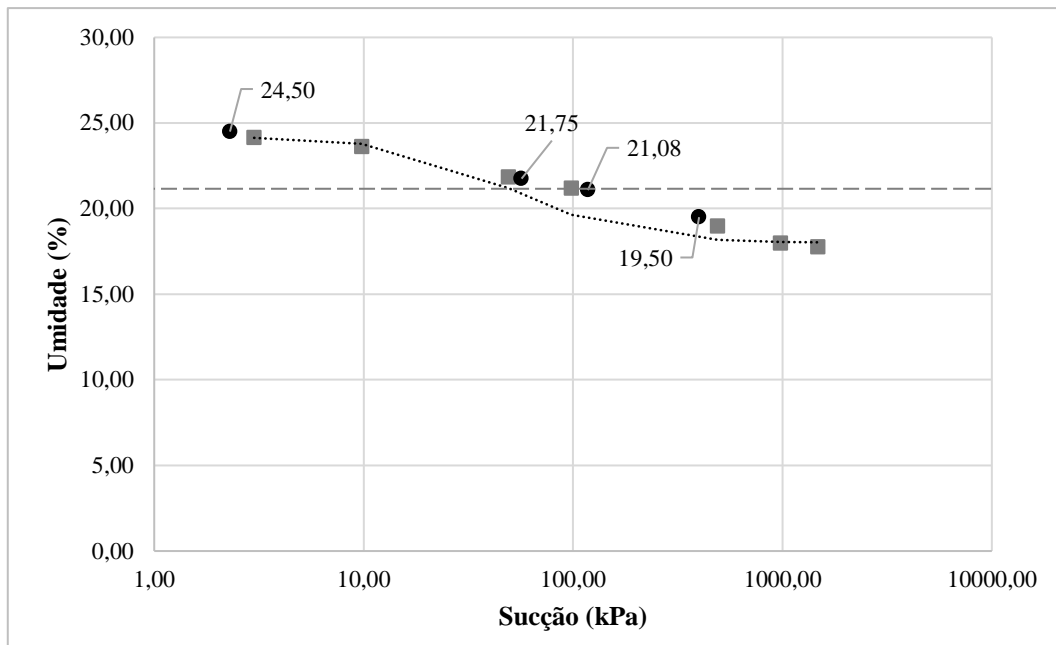


Figura 5.16 – Solo 3 (M3): Curva característica.

Observa-se que o solo 1 (M1) apresentou uma sucção de 26,34 kPa na umidade ótima, o que indica uma baixa capacidade de retenção de água. Já o solo 2 (M2) apresentou uma sucção bem mais elevada, de 195,53 kPa, indicando uma maior capacidade de retenção de água em relação ao solo 1 (M1). Por fim, o solo 3 (M3) apresentou uma sucção intermediária, de 117,72 kPa, indicando uma capacidade de retenção de água também intermediária.

Os valores de sucção no ramo seco indicam a capacidade de retenção de água do solo em condições de baixa umidade. Pode-se observar que o solo 1 (M1) apresenta o maior valor de sucção (936,22 kPa), seguido pelo solo 2 (M2) (840,06 kPa) e pelo solo 3 (M3) (399,84 kPa). Essa ordem indica que o solo 1 (M1) tem maior capacidade de retenção de água em condições de baixa umidade do que o solo 2 (M2) e o solo 3 (M3). Já o solo 3 (M3), apresenta a menor capacidade de retenção de água entre os três solos analisados.

Ao comparar os valores de sucção dos solos nos ramos úmido 1 e úmido 2, é possível observar que, em geral, a sucção no ramo úmido 1 é maior do que no ramo úmido 2 para todas as amostras de solo. Nota-se que a sucção das amostras de M2w1 e M2w2 (123,96 kPa e 25,26 kPa) são maiores que as do M1w1 e M2w2 (12,01 kPa e 7,02 kPa) e M3w1 e M3w2 (56,80 kPa e 2,30 kPa), respectivamente, em ambos os ramos úmido 1 e úmido 2. Isso sugere que o solo 2 (M2) tem uma capacidade maior de reter água em

comparação com os outros dois solos. Já as amostras de solo 1 (M1) apresentam valores mais baixos de sucção em ambos os ramos úmidos, indicando menor capacidade de retenção de água. As amostras de solo 3 (M3) apresentam valores intermediários de sucção em ambos os ramos úmidos.

Portanto, ao comparar os materiais verifica-se que o solo 2 (M2) apresentou valores mais elevados nas faixas da umidade ótima (M2wot), ramo úmido 1 (M2w1) e úmido 2 (M2w2), indicando maior capacidade em reter água. Já o solo 1 (M1) apresentou os valores mais baixos em ambos os ramos úmidos (M1w1 e M1w2) e umidade ótima (M1wot), sugerindo menor capacidade em reter água. O solo 3 (M3) apresentou valores intermediários para todas as faixas de umidade; porém, ainda assim, foram consideravelmente superiores ao solo 2 (M2).

É importante ressaltarmos que a histerese na sucção é impactada por uma gama diversificada de fatores, incluindo a mineralogia do solo e a presença de componentes orgânicos. De modo a compreender completamente esses fatores, uma abordagem mais minuciosa é necessária, envolvendo experimentos e análises detalhadas que podem requerer recursos adicionais, principalmente em termos de equipamentos. Contudo, devido à limitação de recursos disponíveis, optou-se por não investigar a histerese. Neste estudo, a abordagem se concentrou de maneira mais específica na compreensão aprofundada dos efeitos do comportamento hidromecânico na pavimentação.

Cabe salientarmos que a decisão de não abordar a histerese na sucção não diminui a relevância desta pesquisa. Acreditamos que a avaliação da histerese poderá servir como estímulo para futuras pesquisas concentradas nesse fenômeno. Isto posto, por sua vez, contribuirá para uma compreensão mais completa e abrangente do comportamento dos solos em contextos diversos.

5.3.2 Comportamento hidromecânico

O comportamento hidromecânico, representado pelas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19, é a relação entre o módulo de resiliência e a sucção, medida pela capacidade resiliência do solo e sua capacidade de retenção de água. Em geral, espera-se que haja uma relação proporcional entre o módulo resiliente e a sucção do solo. Isso significa que, quanto maior o módulo resiliente, maior será a sucção. Essa relação é esperada porque a sucção do solo é uma medida da capacidade do solo em reter água, e essa capacidade pode afetar a rigidez

do solo. Portanto, o aumento da sucção pode levar a um aumento no módulo resiliente, indicando que o solo está mais rígido e capaz de suportar melhor as cargas a ele demandadas. Os resultados relativos à umidade, M_R e sucção estão expostos nas Tabelas A.3, A.4 e A.5 do APÊNDICE A.

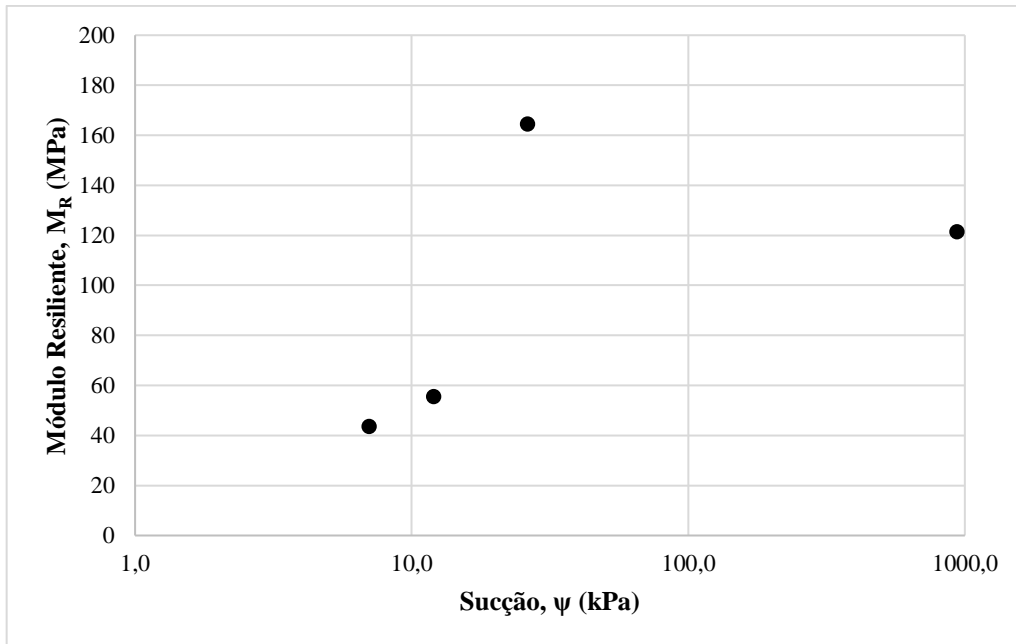


Figura 5.17 – Solo 1: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.

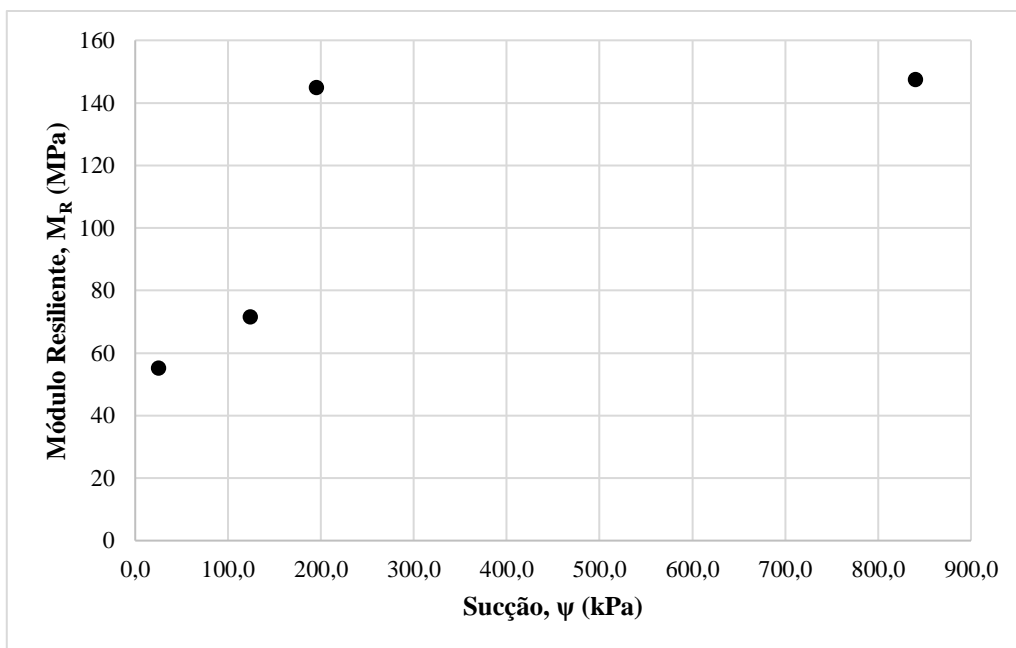


Figura 5.18 – Solo 2: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.

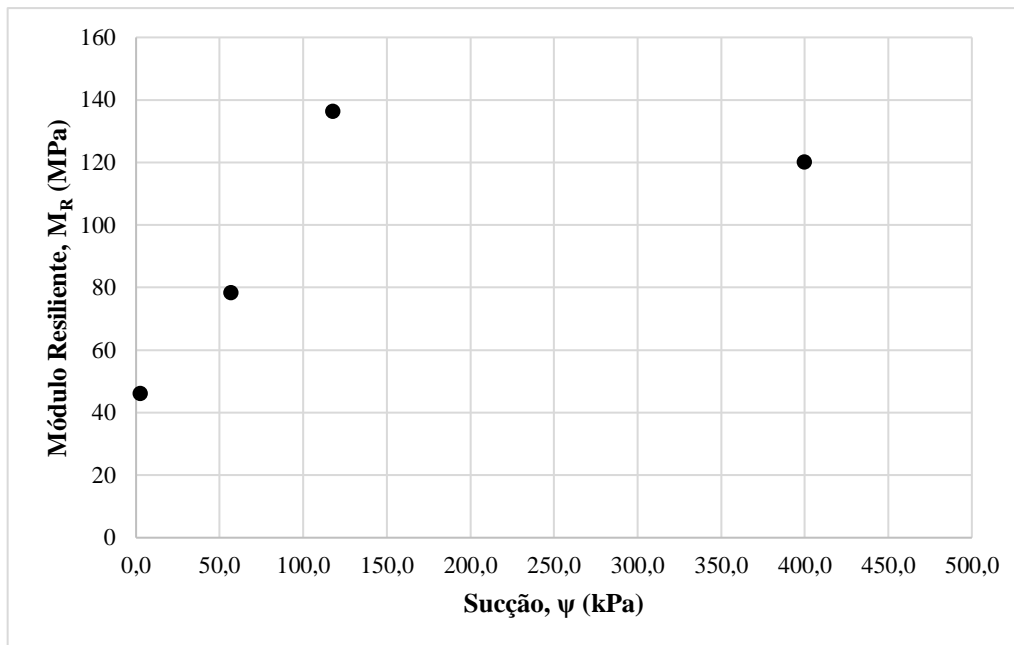


Figura 5.19 – Solo 3: Relação entre o módulo de resiliência versus a sucção.

Na Figura 17, é possível observar que o solo 1 (M1) apresenta uma grande variação nos valores de sucção e módulo resiliente em diferentes condições de umidade. O M1wot apresenta o valor de sucção de 26,34 kPa, e o maior valor de módulo resiliente, 164,49 MPa. Já no estado seco, M1ws, a sucção aumenta significativamente para 936,22 kPa, enquanto o valor de módulo resiliente diminui para 121,46 MPa. Nos estados úmidos 1 (M1w1) e 2 (M2w2), os valores de sucção diminuem ainda mais para 12,01 kPa e 7,02 kPa, respectivamente, e os valores de módulo resiliente diminuem para 55,57 MPa e 43,54 MPa, respectivamente. Em geral, esses resultados indicam que o solo 1 (M1) apresenta uma capacidade moderada de reter água, e de resistência mecânica em diferentes condições de umidade.

Ao analisar Figura 5.18, pelos dados do solo 2 (M2) é possível observar que o M2wot apresenta o valor de sucção e módulo resiliente em uma faixa intermediária (195,53 kPa e 144,95 MPa), indicando que o solo apresenta uma capacidade moderada de retenção de água e boa deformação elástica. Nos casos do material no ramo seco (M2ws) e úmido 1 (M2w1), observa-se uma queda no módulo resiliente e sucção, 147,41MPa, 840,06 kPa,71,57MPa e 123,96 kPa, respectivamente, indicando que a capacidade de suporte do solo é menor nessas condições. Já o material no ramo úmido 2 (M2w2), é possível observar que os valores de sucção são os menores entre todas as condições analisadas, juntamente com o módulo resiliente mais baixo (25,26 kPa e 55,07

MPa). Esses resultados sugerem que o solo está com alta umidade e apresenta menor capacidade de deformação elástica.

Sendo assim, ao explorar a Figura 5.19, pelos resultados do solo 3 (M3) é possível notar que o material M3wot apresenta o valor de sucção e módulo resiliente 117,72 kPa e 136,43 MPa, respectivamente, enquadrando-se numa faixa intermediária em comparação com os demais solos. Quando o M3 se encontra no ramo seco (M3ws), a sucção aumenta para 399,84 kPa, e o módulo resiliente diminui para 120,16 MPa, sugerindo que a presença de água ajuda a manter a resistência do solo. Por outro lado, o M3 nos ramos úmidos 1 (M3w1) e 2 (M3w2), 56,80 kPa e 2,30 kPa de sucção, respectivamente, o módulo resiliente diminui significativamente para 78,34 MPa e 46,11 MPa, respectivamente, indicando menor capacidade de suporte de carga nessas condições.

Por fim, ao comparar as Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 dos três solos analisados, é possível observar que o solo 1 (M1) apresenta os maiores valores de módulo resiliente em todas as condições, exceto no solo seco, onde o solo 2 (M2) tem um valor ligeiramente maior. Por outro lado, o solo 2 (M2) tem os valores mais altos de sucção em todas as condições, indicando que possui maior capacidade de retenção de água em comparação com os outros solos. Quanto ao comportamento em relação à umidade, os solos apresentam respostas diferentes. O solo 1 (M1) e o solo 3 (M3) apresentam uma diminuição significativa do módulo resiliente com o aumento da umidade, enquanto o solo 2 (M2) apresenta um comportamento oposto, com um aumento no módulo resiliente em condições úmidas. Em relação à sucção, os valores do solo 3 (M3) são intermediários entre os valores dos solos M1 e M2.

5.3.3 Dimensionamento mecânico-empírico

Para a determinação das espessuras dos revestimentos dos pavimentos foram adotados diferentes limites de área trincada (AT) para um período de 10 anos. Em outras palavras, determinou-se as espessuras dos pavimentos para atender à demanda de tráfego, e segundo a tolerância de trincamentos estimados na superfície do revestimento estabelecido. Posteriormente, com as espessuras estabelecidas, foi verificado quanto tempo levaria para a superfície do revestimento trincar em 30%, o que foi nomeado de vida útil (VU), demonstradas nas Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11. No APÊNDICE A, a Tabela

A.6 mostram os valores de espessuras do revestimento obtidos no dimensionamento dos pavimentos, e ao realizar o arredondamento obteve-se as espessuras adotadas para projeto.

Tabela 5.9 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 1 (M1).

Cenário	%AT	e (cm)	M1wot	M1ws	M1w1	M1w2
			VU (Wot)	VU (Ramo Seco)	VU (Ramo úmido 1)	VU (Ramo úmido 2)
Cenário 1	20	12,5	159	152	124	120
Cenário 2	25	11,5	139	133	109	106
Cenário 3	30	11,0	130	124	102	99
Cenário 4	35	10,0	113	108	89	86
Cenário 5	40	9,5	105	100	83	81

Tabela 5.10 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 2 (M2).

Cenário	%AT	e (cm)	M2wot	M2ws	M2w1	M2w2
			VU (Wot)	VU (Ramo Seco)	VU (Ramo úmido 1)	VU (Ramo úmido 2)
Cenário 6	20	13,0	162	146	149	140
Cenário 7	25	12,0	142	129	131	123
Cenário 8	30	11,0	120	113	114	107
Cenário 9	35	10,5	115	106	106	100
Cenário 10	40	9,5	100	92	92	87

Tabela 5.11 – Espessura do revestimento e vida útil de cada pavimento para cada critério de dimensionamento e tipo de material para o subleito – solo 3 (M3).

Cenário	%AT	e (cm)	M3wot	M3ws	M3w1	M3w2
			VU (Wot)	VU (Ramo Seco)	VU (Ramo úmido 1)	VU (Ramo úmido 2)
Cenário 11	20	13,0	162	168	149	133
Cenário 12	25	12,0	142	147	131	117
Cenário 13	30	11,0	120	128	114	102
Cenário 14	35	10,0	108	112	106	90
Cenário 15	40	9,0	94	97	92	78

Observa-se que, quanto menor a tolerância quanto ao trincamento do revestimento, maiores serão as espessuras obtidas. Também nesse sentido, podemos notar que com espessuras maiores tem-se maiores vidas úteis. Os pavimentos que demandam maiores espessuras para todos os critérios de área trincada são os dos cenários 9, 10, 11 e 12. Todavia, os pavimentos que requerem menores espessuras de revestimento são os dos cenários 1, 2, 3 e 4.

5.3.4 Inventário de Ciclo de Vida

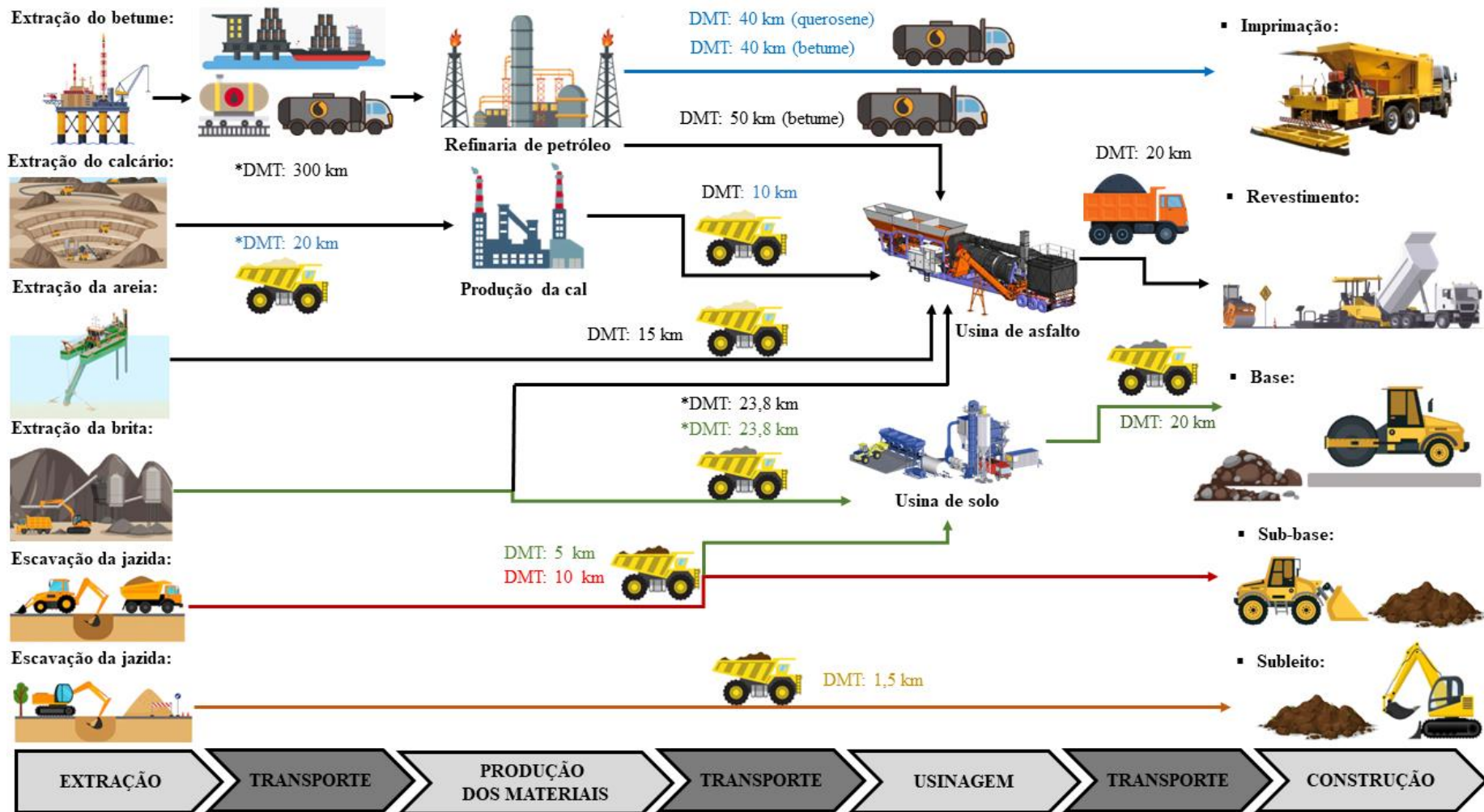
A Figura 5.20 apresenta as atividades do escopo delimitado pelas fases de extração e produção de insumos, fabricação dos materiais, usinagem, e transporte dos insumos necessários para as atividades previstas em cada etapa; e por fim, a construção que abrange a operação de equipamentos de engenharia.

No tópico III do Anexo I, foram esclarecidos os significados das siglas frequentemente empregadas no *software* SimaPro e na biblioteca Ecoinvent 3.0. Neste estudo, a metodologia APOS e *unit* foi adotada. Dos insumos disponíveis com base no contexto brasileiro, todos foram selecionados. Sempre que viável, a abordagem *market* foi utilizada, permitindo que os consumos relativos ao transporte fossem considerados desde o início. Apenas o insumo areia foi modelado como *transformation*, devido à ausência da opção de *market*, de modo que o transporte foi tratado separadamente.

Realizou-se a elaboração do Inventário da Avaliação do Ciclo de Vida (AICV) considerando-se as etapas definidas do escopo. A fase de extração compreendeu a obtenção de matérias-primas como betume, querosene, calcário, areia e brita, além da aquisição do solo de jazida de empréstimo e solo de extração *in situ*. No processo de produção dos materiais, foi incluído a fabricação de cal, asfalto diluído e asfalto (CAP 50/70). A representação do asfalto diluído foi modelada com base na combinação de 50% de betume e 50% de querosene, conforme indicado na ficha de informações da Acelen (2021).

A etapa de mistura dos materiais para a formação das camadas envolveu a utilização de uma usina de asfalto para criar a camada de revestimento. Para representar a usina de asfalto no banco de dados Ecoinvent 3.0, foram adotadas as diretrizes conforme exposto no artigo de Vega *et al.* (2020). A usina de solo foi empregada para a mistura dos materiais brita e solo extraído da jazida de empréstimo, com a proporção de 30% de brita e 70% de solo, constituindo a camada de base. Nos insumos que representam cada parte da usina, é relevante destacarmos que o consumo de combustível e energia está incorporado na composição/insumo escolhida na base de dados do Ecoinvent.

Na etapa de construção, os dados operacionais dos equipamentos em termos de horas de trabalho, ou seja, produtividade mecânica, foram obtidos do Sicro, bem como os equipamentos utilizados para a execução das camadas.



Nota: *DMT (Distância Média de Transporte) estabelecida pelo SimaPro pela base de dados Ecoinvent.

Figura 5.20 – Ilustração das etapas do Inventário de Ciclo de Vida do estudo de caso.

A base de dados Ecoinvent 3.0 segmenta as categorias de emissão de gases de veículos automotores conforme as classificações EURO 1 a EURO 5. Em conformidade com as orientações fornecidas pelo Ministério do Meio Ambiente - MMA (2014), conforme detalhado no relatório de inventário de veículos de transporte rodoviário de 2013, a classificação adotada no Brasil é baseada no PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores). Além disso, segundo esse relatório, a norma de emissão EURO 3 é equivalente ao padrão PROCONVE 5, que representa a maior proporção da frota de veículos de carga rodoviária no país, cerca de 45%. Em decorrência disso, os veículos escolhidos para este estudo foram selecionados considerando-se as emissões correspondentes à norma EURO 3.

A compatibilidade com o Ecoinvent também envolve a consideração da potência dos veículos. Além disso, é essencial destacarmos que a unidade de medida adotada é Tkm (tonelada por quilômetro transportado). Nesse sentido, a distância percorrida entre as etapas é representada pelas DMTs (Distâncias Médias de Transporte), conforme ilustrado na Figura 5.20. No caso de DMTs não fornecidas pelo banco de dados do Ecoinvent para as etapas específicas do escopo, foram estimadas aquelas com base em distâncias típicas na região próxima à cidade do Rio de Janeiro.

Determinou-se os volumes de material por meio da espessura dimensionada no *software* MeDiNa, considerando a largura da plataforma de 7,20 m e a extensão da via de 1 km, como definida para este estudo. Os detalhes completos sobre os volumes de material por camada estão disponíveis no APÊNDICE A, tópico A.5.

Em sequência, foram elaboradas as composições que melhor representam os serviços de pavimentação dos materiais empregados, conforme detalhado na Tabela 5.4. A partir dessas composições, realizou-se a análise detalhada do Sistema de Custos Referenciais de Obras (Sicro) para identificarmos os insumos correspondentes às etapas do escopo. Nesse sentido, utilizou-se os volumes de material por camada, as quais foram associadas às composições do Sicro, permitindo, assim, a obtenção dos quantitativos de material por insumo e serviço. Os dados relativos a esses insumos, extraídos por meio do Sicro e processados com o auxílio do *software* "90 Compor", estão apresentados organizadamente pelas etapas do escopo no APÊNDICE A, na seção A.6.

Realizou-se a compatibilização dos dados do Sicro com o *software* SimaPro por meio da biblioteca do Ecoinvent, conforme exposto na Tabela 5.12. Esse processo envolveu a correspondência e ajuste das unidades de medida entre as informações do Sicro e as categorias de inventário do Ecoinvent. Os detalhes completos desse procedimento estão disponíveis no APÊNDICE A, na seção A.7.

Tabela 5.12 – Compatibilização das unidades entre a base de dados do Sicro e SimaPro (contínua).

Etapa	Dados de saída do Sicro			Dados de entrada no SimPro		
	Cód. SICRO	Descrição	Unid.	Dados de entrada	Unid.	Atividade
1.1 Extração e fabricação	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	t	-	-	Composição
	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	t	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	kg	Material
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
	M0344	Cal hidratada - a granel	kg	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	kg	Material e Transporte
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	t	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	kg	Material e Transporte
	M0028	Areia média	t	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	kg	Material
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	MJ	Combustível
1.2 Usinagem	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	h	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	MJ	Combustível
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	MJ	Combustível
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	h	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	MJ	Combustível
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
1.4 Construção do Pavimento	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação

Tabela 5.12 – Compatibilização das unidades entre a base de dados do Sicro e SimaPro (continuação).

Dados de saída do Sicro				Dados de entrada no SimPro		
Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Unid.	Etapa	Cód. SICRO	Descrição
2. Imprimação	4011351	Imprimação com asfalto diluído	m²	-	-	Composição
2.1 Extração e fabricação	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	t	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	kg	Material e Transporte
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	t	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	kg	Material e Transporte
	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
2.2 Imprimação da Camada	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	t	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	t	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
3. Base	4011256	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.	m³	-	-	Composição
3.1 Extração	M0191	Brita 1	t	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	kg	Material e Transporte
	E9515	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	t	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	m ³	Material e Transporte
3.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
3.3 Usinagem (Usina de solo)	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	h	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	MJ	Combustível
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
	E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
3.4 Construção da Camada	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	m³	-	-	Composição
4.1 Extração	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	t	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	m ³	Material
4.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte

Tabela 5.12 – Compatibilização das unidades entre a base de dados do Sicro e SimaPro (continuação).

Dados de saída do Sicro				Dados de entrada no SimPro		
Etapa	Cód. SICRO	Etapa	Cód. SICRO	Etapa	Cód. SICRO	Etapa
4.3 Construção da camada	E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
4. Subleito	-	-	m³	-	-	Composição
4.1 Extração	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	t	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	m ³	Material
4.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	tkm	Transporte
4.3 Construção da camada	E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	h	Operação

Nas Tabelas 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 estão apresentados os dados referentes aos insumos utilizados em diferentes etapas do processo, como revestimento, imprimação, base, sub-base e subleito, respectivamente para todos os cenários. Esses dados foram previamente compatibilizados com a biblioteca Ecoinvent, visando a integração no *software* SimaPro. Estes cenários variam em relação ao tipo de material utilizado para o subleito, considerando-se três tipos distintos de solos estudados, e se alteram com relação à porcentagem de área trincada.

Tabela 5.13 – Dados de saída do SICRO: quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento.

Etapa	Unid.	Quantidade de material															
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	
1. Revestimento	t	139,31	128,16	122,59	111,45	105,87	144,88	133,74	122,59	117,02	105,87	144,88	133,74	122,59	111,45	100,30	
	tkm	6.965,40	6.408,20	6.129,55	5.572,35	5293,7	7.244,05	6.686,80	6.129,55	5.850,95	5.293,70	7.244,05	6.686,80	6.129,55	5.572,35	5.015,10	
	kg	123.819,84	113.914,25	108.961,46	99.055,87	94.103,08	128.772,63	118.867,05	108.961,46	104.008,67	94.103,08	128.772,63	118.867,05	108.961,46	99.055,87	89.150,29	
	1.1 Extração e fabricação	tkm	123,82	1.139,14	1.089,61	990,56	941,03	1.287,73	1.188,67	1.089,61	1.040,09	941,03	1.287,73	1.188,67	1.089,61	990,56	891,50
		t	866,83	797,48	762,81	693,46	658,79	901,50	832,15	762,81	728,14	658,79	901,50	832,15	762,81	693,46	624,12
		t	1.073,25	987,39	944,46	858,60	815,67	1.116,18	1.030,32	944,46	901,53	815,67	1.116,18	1.030,32	944,46	858,60	772,74
	tkm	1.073,25	14.810,78	14.166,83	12.878,94	12.234,99	16.742,63	15.454,73	14.166,83	13.522,89	12.234,99	16.742,63	15.454,73	14.166,83	12.878,94	11.591,04	
1.2 Usinagem	h	22,23	20,45	19,56	17,78	8,56	23,12	21,34	19,56	18,67	16,89	23,12	21,34	19,56	17,78	16,00	
	h	22,12	20,35	19,47	17,70	16,81	23,01	21,24	19,47	18,58	16,81	23,01	21,24	19,47	17,70	15,93	
	h	8,70	8,01	7,66	6,96	6,61	9,05	8,36	7,66	7,31	6,61	9,05	8,36	7,66	6,96	6,27	
	h	22,12	20,35	19,47	17,70	16,81	23,01	21,24	19,47	18,58	16,81	23,01	21,24	19,47	17,70	15,93	
	h	22,12	20,35	19,47	17,70	16,81	23,01	21,24	19,47	18,58	16,81	23,01	21,24	19,47	17,70	15,93	
1.3 Transporte da Usina para obra	tkm	44.064,00	40.538,89	38.776,31	35.251,22	33.488,64	45.826,57	42.301,44	38.776,31	37.013,77	33.488,64	45.826,57	42.301,44	38.776,31	35.251,22	31.726,07	
1.4 Construção do Pavimento	h	15,40	15,40	13,55	12,32	11,70	16,01	14,78	13,55	12,93	11,70	16,01	14,78	13,55	12,32	11,09	
	h	17,78	17,78	15,65	14,23	13,52	18,49	17,07	15,65	14,94	13,52	18,49	17,07	15,65	14,23	12,80	
	h	21,69	21,69	19,08	17,35	16,48	22,55	20,82	19,08	18,22	16,48	22,55	20,82	19,08	17,35	15,61	

Tabela 5.14 – Dados inseridos no SimaPro: quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento.

Etapa		Quantidade de material														
1. Revestimento	Unid.	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15
1.1 Extração e fabricação	kg	139.308,00	128.164,00	122.591,00	111.447,00	105.874,00	144.881,00	133.736,00	122.591,00	117.019,00	105.874,00	144.881,00	133.736,00	122.591,00	111.447,00	100.302,00
	tkm	6.965,40	6.408,20	6.129,55	5.572,35	5293,7	7.244,05	6.686,80	6.129,55	5.850,95	5.293,70	7.244,05	6.686,80	6.129,55	5.572,35	5.015,10
	kg	123.819,84	113.914,25	108.961,46	99.055,87	94.103,08	128.772,63	118.867,05	108.961,46	104.008,67	94.103,08	128.772,63	118.867,05	108.961,46	99.055,87	89.150,29
	tkm	1.238,20	1.139,14	1.089,61	990,56	941,03	1.287,73	1.188,67	1.089,61	1.040,09	941,03	1.287,73	1.188,67	1.089,61	990,56	891,50
	kg	866.827,00	797.481,00	762.808,00	693.462,00	658.789,00	901.500,00	832.154,00	762.808,00	728.135,00	658.789,00	901.500,00	832.154,00	762.808,00	693.462,00	624.115,00
	kg	1.073.245,00	987.385,00	944.455,00	858.596,00	815.666,00	1.116.175,00	1.030.315,00	944.455,00	901.526,00	815.666,00	1.116.175,00	1.030.315,00	944.455,00	858.596,00	772.736,00
	tkm	16.098,68	14.810,78	14.166,83	12.878,94	12.234,99	16.742,63	15.454,73	14.166,83	13.522,89	12.234,99	16.742,63	15.454,73	14.166,83	12.878,94	11.591,04
1.2 Usinagem	h	22,23	20,45	19,56	17,78	8,56	23,12	21,34	19,56	18,67	16,89	23,12	21,34	19,56	17,78	16,00
	MJ	29.065,68	26.741,21	25.578,32	23.252,54	22.090,97	30.228,57	27.904,10	25.578,32	24.415,43	22.090,97	30.228,57	27.904,10	25.578,32	23.252,54	20.928,08
	MJ	14.255,51	13.115,47	12.545,44	11.403,76	10.833,73	14.825,54	13.685,49	12.545,44	11.973,78	10.833,73	14.825,54	13.685,49	12.545,44	11.403,76	10.263,71
	MJ	955,58	879,16	840,93	764,47	726,28	993,82	917,40	840,93	802,70	726,28	993,82	917,40	840,93	764,47	688,05
	MJ	20.704,32	19.048,54	18.220,18	16.563,46	15.736,03	21.532,68	19.876,90	18.220,18	17.391,82	15.736,03	21.532,68	19.876,90	18.220,18	16.563,46	14.907,67
1.3 Transporte da Usina para obra	tkm	44.064,00	40.538,89	38.776,31	35.251,22	33.488,64	45.826,57	42.301,44	38.776,31	37.013,77	33.488,64	45.826,57	42.301,44	38.776,31	35.251,22	31.726,07
1.4 Construção do Pavimento	h	15,40	15,40	13,55	12,32	11,70	16,01	14,78	13,55	12,93	11,70	16,01	14,78	13,55	12,32	11,09
	h	17,78	17,78	15,65	14,23	13,52	18,49	17,07	15,65	14,94	13,52	18,49	17,07	15,65	14,23	12,80
	h	21,69	21,69	19,08	17,35	16,48	22,55	20,82	19,08	18,22	16,48	22,55	20,82	19,08	17,35	15,61

Tabela 5.15 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – Todos os cenários.

Etapa	Dados de saída do SICRO		Dados de entrada no SIMAPRO	
	Quantidade de material	Unidade	Quantidade de material	Unidade
2.1 Extração e fabricação	4,32	t	4.320,00	kg
	4,32	t	4.320,00	kg
	345,60	tkm	345,60	tkm
2.2 Imprimação da Camada	12,80	h	12,80	h
	6,40	h	6,40	h

Tabela 5.16 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – Todos os cenários.

Etapa	Dados de saída do SICRO		Dados de entrada no SIMAPRO	
	Quantidade de material	Unidade	Quantidade de material	Unidade
3. Base				
3.1 Extração	668,41	t	668.412,00	kg
	1.559,64	t	1.039,76	m ³
3.2 Transporte	7.798,20	tkm	7.798,20	tkm
3.3 Usinagem (Usina de solo)	6,71	h	10.992,62	MJ
	44.561,02	tkm	44.561,02	tkm
3.4 Construção da Camada	7,16	h	7,16	h
	6,16	h	6,16	h
	6,44	h	6,44	h
	4,44	h	4,44	h
	5,94	h	5,94	h

Tabela 5.17 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de sub-base – Todos os cenários.

Etapa	Dados de saída do SICRO		Dados de entrada no SIMAPRO	
	Quantidade de material	Unidade	Quantidade de material	Unidade
4. Sub-base				
4.1 Extração	4.455,00	t	2.970,00	m ³
4.2 Transporte	44.550,00	tkm	44.550,00	tkm
4.3 Construção da camada	9,54	h	9,54	h
	9,25	h	9,25	h
	9,63	h	9,63	h
	6,65	h	6,65	h
	11,94	h	11,94	h

Tabela 5.18 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de subleito – Todos os cenários.

Etapa	Dados de saída do SICRO		Dados de entrada no SIMAPRO	
	Quantidade de material	Unidade	Quantidade de material	Unidade
4. Subleito				
4.1 Extração	1.485,00	t	990,00	m ³
4.2 Transporte	2.227,50	tkm	2.227,50	tkm
4.3 Construção da camada	3,18	h	3,18	h
	3,08	h	3,08	h
	3,21	h	3,21	h
	2,22	h	2,22	h
	3,98	h	3,98	h

5.3.5 Análise do impacto do ciclo de vida (AICV)

Observando-se a Tabela 5.19, os impactos ambientais e o consumo de energia dos cenários 3, 8 e 13; 4 e 14; 5 e 10; 6 e 11; 7 e 12; os valores são os mesmos, pois os resultados do dimensionamento das espessuras adotadas para as camadas de revestimento são iguais.

Em relação à energia requerida, observa-se que os maiores e menores consumos foram iguais a todos os cenários. Desse modo, nota-se que as maiores quantidades de energia requerida para a construção de um quilômetro do pavimento rodoviário são para os cenários para uma AT de 20%. Por outro lado, os cenários que menos demandam energia são para uma AT de 40%. Ainda na Tabela 3.6, percebe-se que as pegadas ambientais de CO₂, N₂O e CH₄, geradas por cada cenário, decrescem à medida que se diminui a tolerância quanto AT. Sendo assim, constata-se o mesmo comportamento para o CO₂ equivalente.

Tabela 5.19 – Quantidades energia consumida e gases de efeito estufa emitida na fabricação dos insumos e no funcionamento dos equipamentos de engenharia na construção por quilômetro de pista construída (contínua).

%AT	Parâmetros	Solo 1	Solo 2	Solo 3
	Cenário	Cenário 1	Cenário 6	Cenário 11
	Esp. Ver.	12,5	13	13
20	QE (MJ)	1063,32	1090,85	1090,85
	CO ₂ (t)	144,42	148,91	148,91
	CH ₄ (kg)	261,34	270,39	270,39
	N ₂ O (kg)	6,84	7,02	7,02
	CO ₂ Eq. (t)	154,19	158,80	158,80

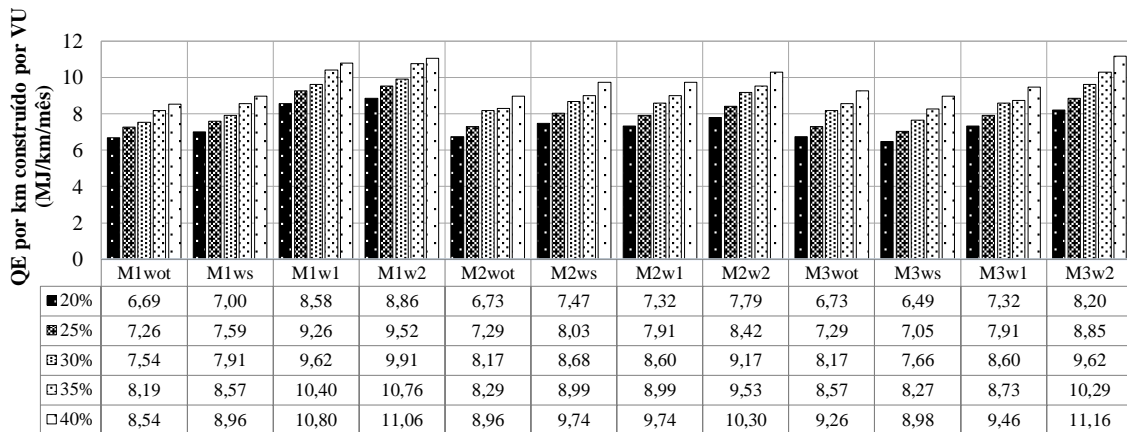
Tabela 5.19 – Quantidades energia consumida e gases de efeito estufa emitida na fabricação dos insumos e no funcionamento dos equipamentos de engenharia na construção por quilômetro de pista construída (continuação).

%AT	Parâmetros	Solo 1	Solo 2	Solo 3
25	Cenário	Cenário 2	Cenário 7	Cenário 12
	Esp. Ver.	11,5	12	12
	QE (MJ)	1009,35	1035,80	1035,80
	CO ₂ (t)	136,87	140,47	140,47
	CH ₄ (kg)	243,58	252,30	252,30
	N ₂ O (kg)	6,50	6,66	6,66
	CO ₂ Eq. (t)	145,81	149,73	149,73
30	Cenário	Cenário 3	Cenário 8	Cenário 13
	Esp. Ver.	11	11	11
	QE (MJ)	980,77	980,77	980,77
	CO ₂ (t)	132,02	132,02	132,02
	CH ₄ (kg)	234,23	234,23	234,23
	N ₂ O (kg)	6,29	6,29	6,29
	CO ₂ Eq. (t)	140,66	140,66	140,66
35	Cenário	Cenário 4	Cenário 9	Cenário 14
	Esp. Ver.	10	10,5	10
	QE (MJ)	925,73	953,27	925,73
	CO ₂ (t)	123,59	127,81	123,59
	CH ₄ (kg)	216,14	225,18	216,14
	N ₂ O (kg)	5,93	6,11	5,93
	CO ₂ Eq. (t)	131,60	136,05	131,60
40	Cenário	Cenário 5	Cenário 10	Cenário 15
	Esp. Ver.	9,5	9,5	9
	QE (MJ)	896,18	896,18	870,69
	CO ₂ (t)	118,17	118,17	115,14
	CH ₄ (kg)	206,48	206,48	198,06
	N ₂ O (kg)	5,70	5,70	5,56
	CO ₂ Eq. (t)	125,84	125,84	122,53

5.3.6 Avaliação integrada entre desempenhos ambientais

Na Figura 5.21, observa-se as razões entre os consumos energéticos estimados necessários para a construção de um quilômetro de via e a vida útil estimada. Nota-se que o cenário que consome maior quantidade de energia por vida útil obtida é o Pav. 60, do cenário 15 que corresponde 40% de AT, do grupo M3w2 (ramo úmido 2). No entanto, o que menos consome energia é o Pav. 6 do cenário 6 que corresponde 20% de AT, do grupo M2ws (ramo seco). Dentro de faixa de AT, dos 12 grupos, tem-se os maiores e menores consumidores, respectivamente: para 20% de AT M1w2 (Pav. 16) e M3ws

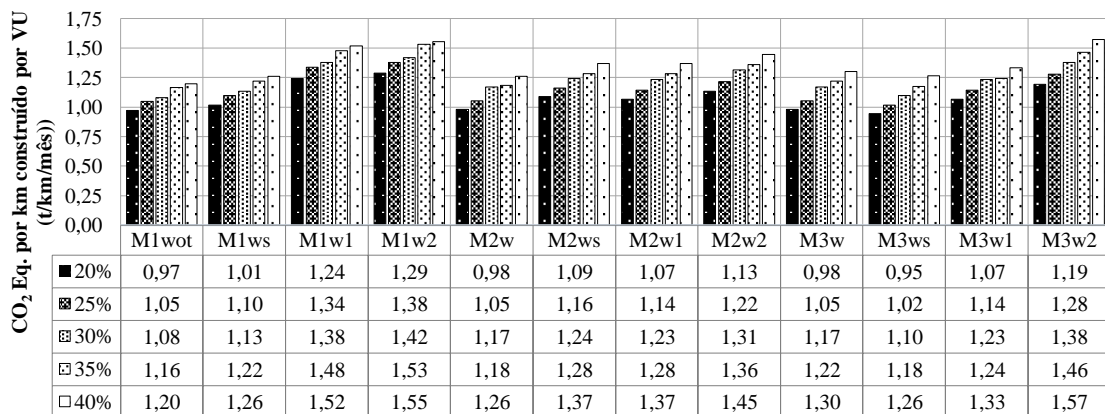
(Pav. 46); para 25% de AT M1w2 (Pav. 17) e M3ws (Pav. 47); para 30% de AT M1w2 (Pav. 18) e M1wot (Pav. 3); para 35% de AT M1w1 (Pav. 14) e M1wot (Pav. 4); para 40% de AT M3w2 (Pav. 60) e M1wot (Pav. 5).



*M1: solo 1; M2: solo 2; M3: solo 3; wot: umidade ótima. ws: ramo seco; w1: ramo úmido 1 e w2: ramo úmido 2.

Figura 5.21 - Razão entre consumo energético (MJ) e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.

Na Figura 5.22, observa-se o Potencial de Aquecimento Global estimado pelo CO₂ Eq. necessário para a construção de um quilômetro de via, e a sua vida útil estimada. Nota-se que o cenário que mais emite CO₂ Eq., por vida útil, é o Pav.60 do cenário 15, relativo a 40% de AT do grupo M3w2 (ramo úmido 2). Contudo, o que menos emite CO₂ Eq. é o Pav. 6, do cenário 6, relativo a 20% de AT do grupo M2ws (ramo seco).



*M1: solo 1; M2: solo 2; M3: solo 3; wot: umidade ótima. ws: ramo seco; w1: ramo úmido 1 e w2: ramo úmido 2.

Figura 5.22 – Razão entre CO₂ Eq. (t) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído.

Dentro de faixa de AT, dos 12 grupos, tem-se os maiores e menores emissores de CO₂ Eq., respectivamente: para 20% de AT M1w2 (Pav. 16) e M3ws (Pav. 46); para 25%

de AT M1w2 (Pav. 17) e M3ws (Pav. 47); para 30% de AT M1w2 (Pav. 18) e M1wot (Pav. 3); para 35% de AT M1w1 (Pav. 14) e M1wot (Pav. 4); para 40% de AT M3w2 (Pav. 60) e M1wot (Pav. 5).

5.3.7 Avaliação integrada entre desempenhos ambientais e o efeito da sucção

A proposta das Figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 é avaliar o impacto ambiental, CO_2 Eq. ou energia requerida, gerado nas etapas de extração, usinagem e construção a partir da avaliação de diferentes materiais e verificar o efeito da sucção nesses solos. Desse modo, ressalta-se a importância de se incorporar a sucção, pois é um fator importante na estabilidade do subleito, e pode afetar a qualidade e a vida útil da rodovia. Desse modo, o eixo y representa a quantidade de consumo energético ou CO_2 Eq. produzida por km de rodovia, dividido pela vida útil do pavimento em anos. Isso significa que quanto maior o consumo energético ou a quantidade de CO_2 Eq. produzida, maior será o impacto ambiental gerado para a construção dessas rodovias. Assim sendo, o eixo x representa a sucção do solo, dividida em três categorias: ramo seco, ramo úmido e ótimo.

Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25, observa-se as razões entre os consumos energéticos estimados necessários para a construção de um quilômetro de via e a vida útil estimada versus o comportamento da sucção nos diferentes tipos de solos. No geral, nota-se que para todos os cenários o que menos consome energia por vida útil são os materiais na umidade ótima. Sendo que proporcionalmente, o “solo 2”, apresenta uma pequena diferença em relação ao ramo seco.

Ainda, de acordo com as Figuras 5.23, 5.24 e 5.25, verifica-se que a partir da perspectiva da umidade ótima e o incremento médio da umidade, trata-se do consumo energético em relação a todas as áreas trincadas dos “solos 1”, “solos 2” e “solos 3” em detrimento dos ramos: seco, úmido 1 e úmido 2, respectivamente são: 5%, 27% e 31%; 9%, 8% e 15%; -4%, 5% e 20%. Desse modo, verifica-se que os pavimentos do grupo M2ws, ou seja, pertencentes ao “solo 2”, possuem o maior incremento médio de umidade em relação ao ramo seco pela umidade ótima. Além disso, dando continuidade à análise no ramo seco, nota-se que houve um decaimento do grupo M3ws, pertencentes ao solo 3.

Essa diminuição se deve ao desempenho mecânico do material, fazendo com que os resultados fossem próximos ao da umidade ótima. Já o grupo M1w1, pertencente ao “solo 1”, possui o maior incremento de umidade médio em relação ao ramo úmido 1, pela

umidade ótima. Logo, o grupo M1w2, pertencente ao “solo 1”, possui o maior incremento de umidade médio em relação ao ramo úmido 2, pela umidade ótima.

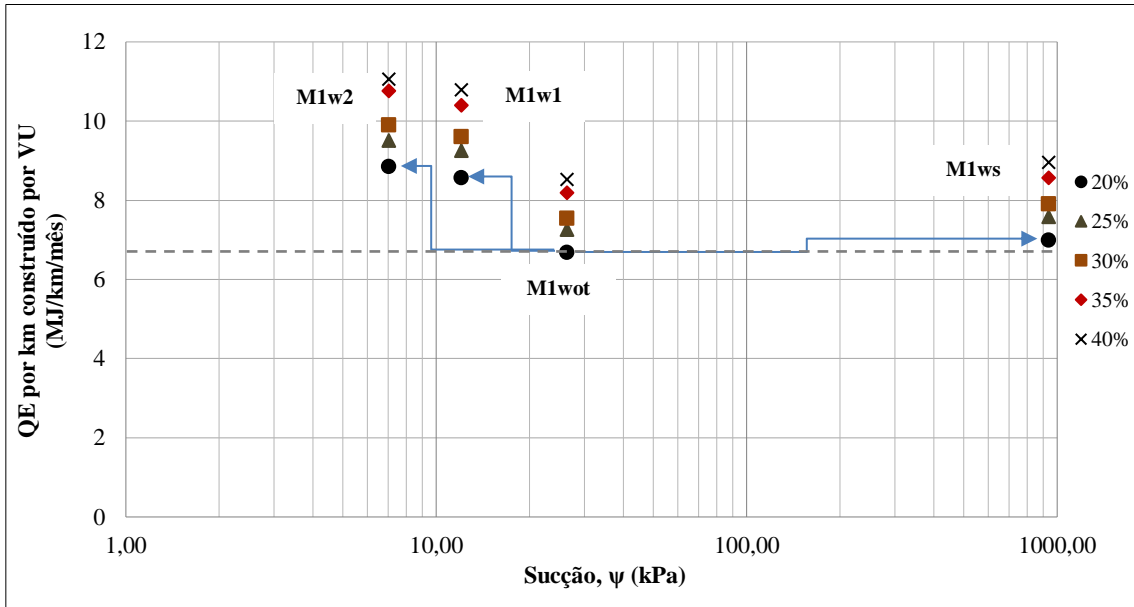


Figura 5.23 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 1.

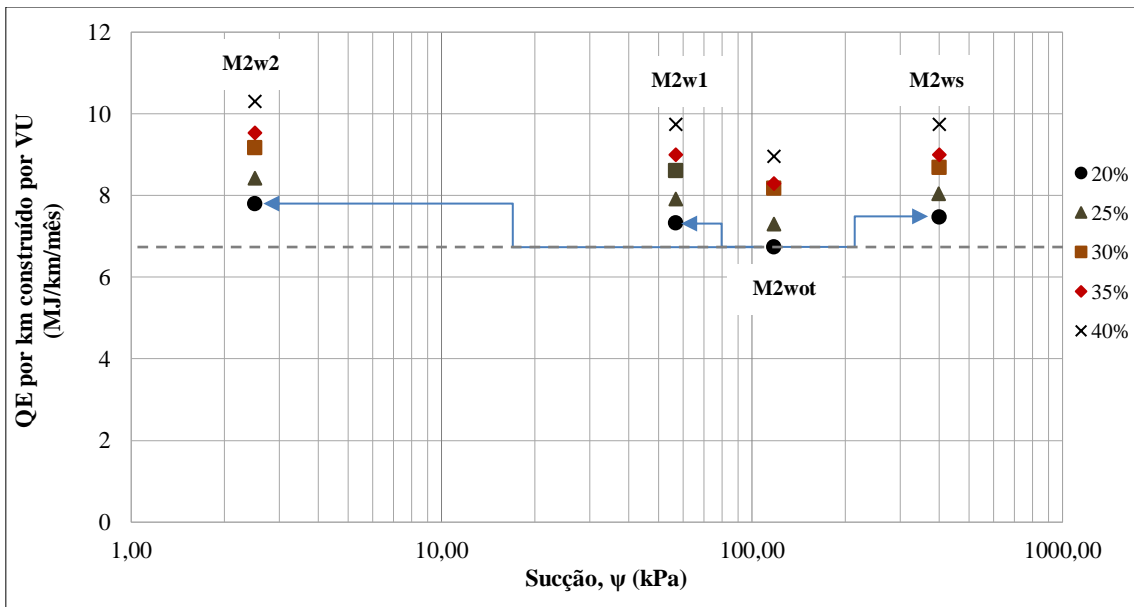


Figura 5.24 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 2.

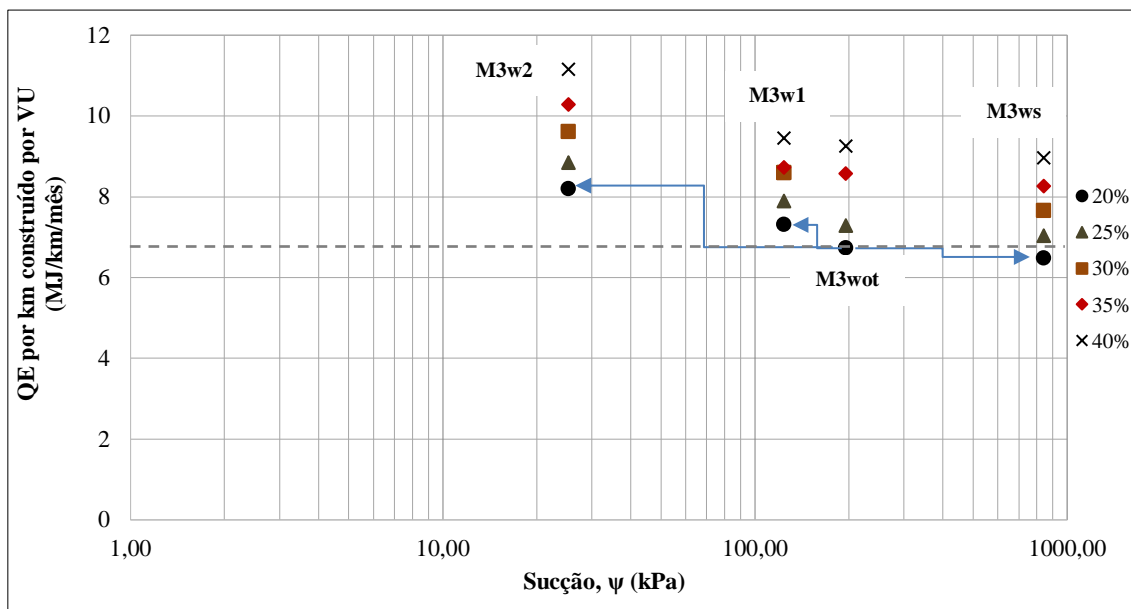


Figura 5.25 – Razão entre Consumo energético (MJ) e Expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus a sucção – Solo 3.

De modo geral, para todos os casos, a faixa de 40% de AT, ou seja, os cenários 5, 10 e 15, são o que mais consomem energia requerida, enquanto os que menos consomem são os da faixa de 20% de AT, sendo os cenários 1, 6 e 11. Por fim, a partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que à medida que se diminui a sucção, aumenta-se a umidade e o consumo de energia requerida.

A Figuras 5.26, 5.27 e 5.28 ilustram as relações entre as emissões de $\text{CO}_2 \text{ Eq.}$ estimadas para a construção de um quilômetro de via e a vida útil estimada, em comparação com o comportamento da sucção em diferentes tipos de solos. De forma geral, pode-se notar que, para todos os cenários, os materiais que geram menor emissão por vida útil são aqueles compactados na umidade ótima.

De acordo com as Figuras 5.26, 5.27 e 5.28, é possível comparar todos os cenários e as respectivas áreas trincadas em relação ao Potencial de Aquecimento Global (GWP100), calculado pelo incremento médio a partir da perspectiva da umidade ótima acerca dos ramos seco, úmido 1 e úmido 2, os quais são, respectivamente: 5%, 27% e 31%; 9%, 8% e 15%; -4%, 5% e 20%. Observa-se que os pavimentos do grupo M2ws, pertencentes ao "solo 2", apresentam maior incremento em relação ao ramo seco na umidade ótima. Verifica-se, ainda, que no ramo seco o grupo M3ws, pertencente ao "solo 3", teve uma diminuição devido ao desempenho mecânico do material, gerando a menor emissão de $\text{CO}_2 \text{ Eq.}$ do que o cenário na umidade ótima. O grupo M1w1, pertencente ao

"solo 1", apresenta o maior incremento em relação ao ramo úmido 1, enquanto o grupo M1w2, pertencente também ao "solo 1", apresenta o maior incremento em relação ao ramo úmido 2.

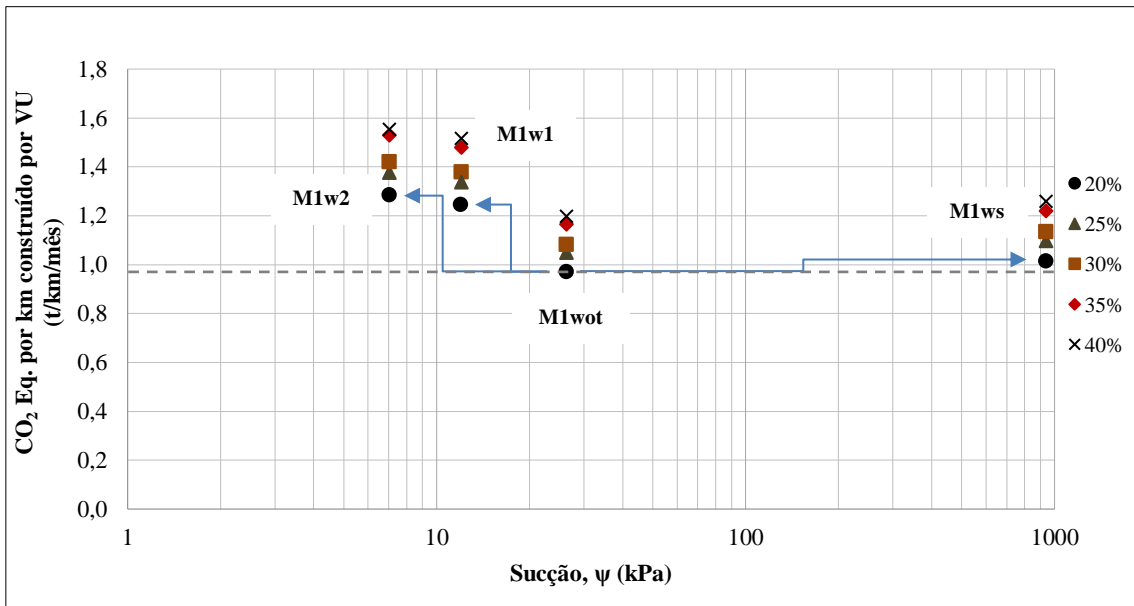


Figura 5.26 – Razão entre kg de CO₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus à sucção – Solo 1.

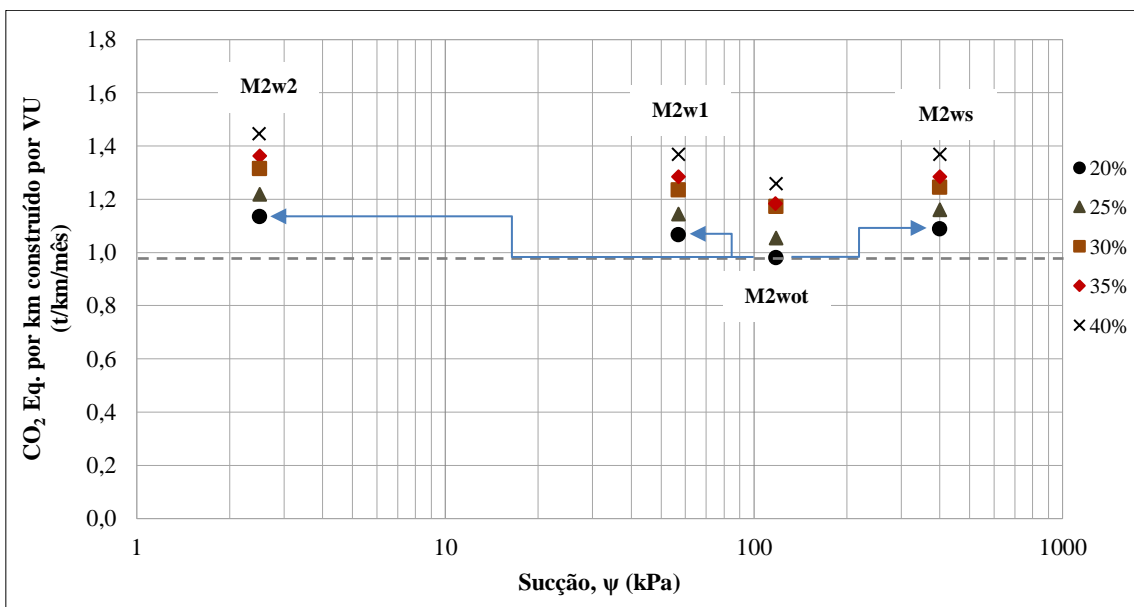


Figura 5.27 – Razão entre kg de CO₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído versus à sucção – Solo 2.

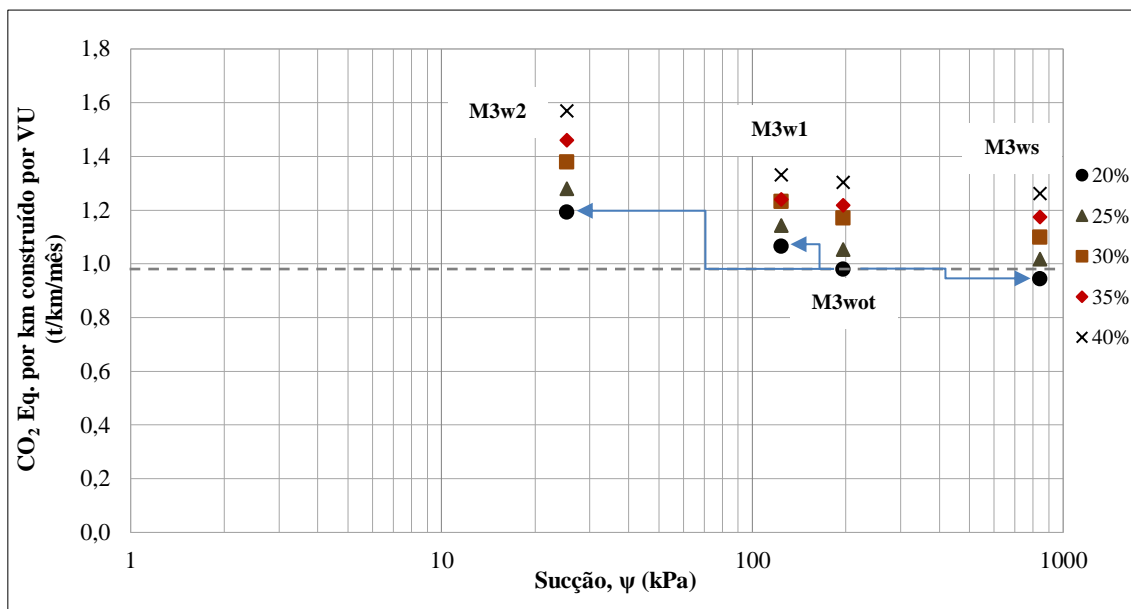


Figura 5.28 – Razão entre kg de CO₂ Eq. emitidos e expectativa de Vida Útil por quilômetro de rodovia construído – Solo 3.

De maneira geral, pode-se observar que a faixa de 40% de AT apresenta a maior emissão de CO₂ Eq. em comparação com todas as outras faixas, enquanto a faixa de 20% de AT é aquela que apresenta a menor emissão de CO₂ Eq. Os resultados obtidos indicam que, à medida que a sucção é reduzida, ou seja, à medida que a umidade é aumentada, a emissão de CO₂ Eq. também aumenta. Por fim, pode-se afirmar que a sucção é inversamente proporcional as emissões de CO₂ Eq. e à umidade.

5.3.8 Análise de Sensibilidade

A Figura 5.29 apresenta os valores de impacto ambiental em termos de emissões de gases de efeito estufa, expressos em kg CO₂ Eq., para diferentes cenários representados por uma combinação específica de solo no subleito e porcentagem de área trincada. Os resultados estão divididos em diferentes categorias, como Combustível (Diesel), Energia, Equipamentos, Escavação de jazida, Material e Transporte (APÊNDICE A, tópico A.9). Os valores apresentados refletem as emissões de cada categoria para cada cenário específico, proporcionando uma visão comparativa das variações de impacto ambiental com base nas diferentes configurações de solo e área trincada.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.29, os cenários demonstram uma variação considerável nas diferentes categorias avaliadas. No que diz respeito ao impacto ambiental relativo ao consumo de combustível (Diesel), observa-se que os Cenários 6, 11 e 1 apresentam consumos relativamente mais elevados, enquanto

os Cenários 15, 1 e 10 registram consumos consideravelmente mais baixos. No aspecto de consumo de energia, as mesmas tendências podem ser observadas, com os Cenários 6, 11 e 1 apresentando valores mais altos, e os Cenários 15, 10 e 5 apresentando valores mais baixos. Em relação aos equipamentos, percebe-se que os Cenários 6, 11 e 1 se destacam com valores mais altos, enquanto os Cenários 15, 10 e 5 registram valores mais baixos. Logo, os cenários com maiores consumos de recursos têm impactos ambientais mais altos em termos de emissões de gases de efeito estufa.

Em relação à escavação de jazida, que é um componente importante da construção de pavimentos, foi demonstrado uma uniformidade nos valores entre os diferentes cenários, indicando que essa etapa é relativamente constante, independentemente das variações nos outros parâmetros. Em termos de consumo de materiais, observa-se que os Cenários 6, 11 e 1 registram valores mais elevados, enquanto os Cenários 15, 10 e 5 apresentam valores mais baixos. Essa diferença pode ser atribuída aos diferentes materiais empregados no subleito e na variação da porcentagem de área trincada, uma vez que ambas afetam diretamente na espessura da camada do revestimento asfáltico.

A categoria Transporte apresenta variações significativas nos valores de emissões de GEE. Os Cenários 6, 11 e 1 têm valores mais elevados de transporte, enquanto os Cenários 15, 10 e 5 apresentam valores mais baixos. Diante disso, os cenários com maior porcentagem de área trincada geralmente têm emissões na categoria transporte mais altas, indicando que a logística e o transporte dos materiais podem contribuir significativamente para o impacto ambiental.

Portanto, as características específicas dos solos podem exigir mais ou menos recursos para a construção das vias. Entre todos os cenários, o solo 1 (M1) tende a apresentar menores emissões de combustível, energia e equipamentos em comparação com os outros solos M1 e M2. Além disso, praticamente em todos os cenários com área trincada em 20% (Cenário 1, Cenário 6 e Cenário 11) ocorreu maior impacto ambiental. Por outro lado, praticamente em todos os cenários com área trincada em 40% (Cenário 5, Cenário 10 e Cenário 15) os impactos ambientais foram menores.

A análise dos cenários indica que há uma tendência de diminuição das emissões de GEE à medida que a porcentagem de área trincada aumenta. No entanto, essa tendência não é linear em todas as categorias, mostrando a importância de se considerar cada categoria individualmente ao avaliarmos o impacto ambiental.

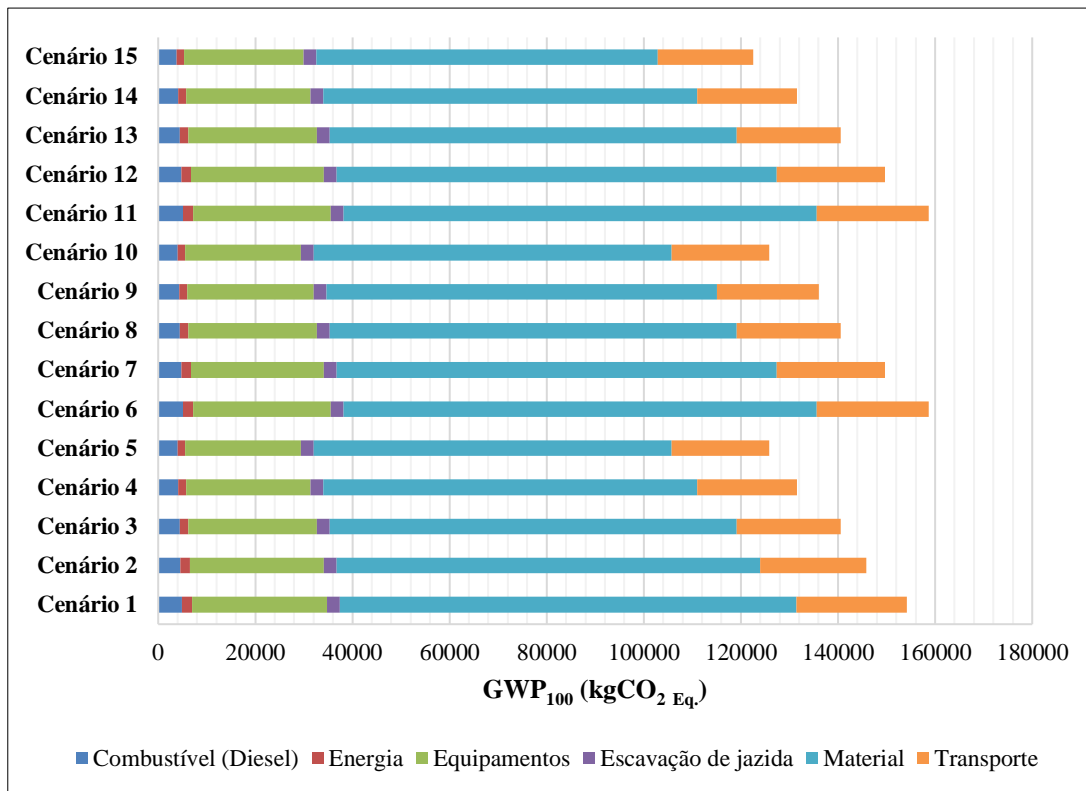


Figura 5.29 – Impacto ambiental GWP₁₀₀ por categoria.

5.3.9 Análise de Incerteza

Nesta pesquisa, a análise de incerteza foi conduzida para avaliar as contribuições relacionadas às alterações climáticas, GWP₁₀₀ (*Global Warming Potential*), na categoria de impacto das emissões de gases de efeito estufa, com a unidade funcional de 1 km de via construída e método AICV por meio do CML, medida em kg CO₂ Eq. Logo, a partir da análise de incerteza verificou-se o comportamento de 15 cenários relativos aos 3 (três) distintos materiais empregados em subleitos com relação às diversas áreas trincadas em 20%, 25%, 30%, 35% e 40%.

A simulação foi realizada utilizando-se a técnica matemática de Monte Carlo, que foi integrada ao *software* SimaPro 9.4.0.2. Essa abordagem permite avaliar a incerteza dos resultados, proporcionando uma compreensão mais robusta e abrangente do impacto ambiental do processo de construção da via, baseada nos valores de média, mediana, desvio padrão (SD), coeficiente de variação de Pearson (CV), distribuição normal e erro padrão da média (SEM - *Standard Error of the Mean*), conforme apresentado na Tabela 5.20, cujos cálculos foram efetuados para cada cenário inventariado. A Figura 5.30 apresenta, para cada cenário, a margem de incerteza absoluta no intervalo de

confiança de 95%, onde as linhas verticais indicam a probabilidade estatística, e as linhas horizontais o impacto ambiental em kg CO₂ Eq. (GWP₁₀₀).

A análise dos resultados a seguir foi conduzida tendo-se, como referência, a Tabela 5.20. De maneira geral, os valores médios e medianos mostram uma tendência de proximidade, indicando uma distribuição dos resultados relativamente simétrica. Considerando os valores de média e mediana, sugere-se que os resultados de todos os cenários exibem simetria, e não demonstram um desvio acentuado em direção a extremos.

Tabela 5.20 – Análise de incerteza relacionada às alterações climáticas dos cenários estudados.

Cenários	Média	Mediana	SD	CV	2,5%	97,5%	SEM
Cenário 1	154339,67	153790,26	7300,17	4,73	141497,54	169091,69	230,85
Cenário 2	146236,97	146074,93	6724,44	4,60	134856,27	160019,25	212,65
Cenário 3	140554,24	139938,56	6812,26	4,85	129095,12	153883,12	215,42
Cenário 4	131969,13	131384,75	6197,76	4,70	121513,49	146908,29	195,99
Cenário 5	125958,94	125608,86	5957,72	4,73	115309,19	139188,25	188,40
Cenário 6	158821,84	158198,27	7609,25	4,79	145648,04	175355,78	240,63
Cenário 7	149985,02	149643,91	6981,23	4,65	137054,11	164743,65	220,77
Cenário 8	140255,51	139963,31	6335,46	4,52	128963,46	153399,93	200,34
Cenário 9	135284,50	135284,50	6348,86	4,68	125443,42	148450,24	200,77
Cenário 10	128516,72	127994,10	5661,51	4,41	119020,64	140890,95	179,03
Cenário 11	158985,83	158327,82	7643,56	4,81	145820,02	175335,68	241,71
Cenário 12	149732,94	149327,81	7160,13	4,78	136919,66	164752,22	226,42
Cenário 13	140990,78	140355,32	7104,70	5,04	129146,53	154711,83	224,67
Cenário 14	131616,18	131200,99	6085,11	4,62	120846,76	144302,98	192,43
Cenário 15	122594,76	122417,76	5463,10	4,46	112874,11	134921,22	172,76

O desvio padrão (SD) fornece uma medida importante da dispersão dos resultados em relação à média. Quanto maior o desvio padrão, maior é a variabilidade dos resultados em torno da média, indicando maior incerteza nos valores obtidos. Observando-se os dados, verifica-se que os cenários com maiores valores de desvio padrão são os Cenário 11 (M3 - AT20%), Cenário 6 (M2 - AT25%) e Cenário 1 (M1 - AT20%), respectivamente, e apresentam uma dispersão mais ampla dos resultados em relação à média. Isto sugere que esses cenários são mais sensíveis a variações nas entradas de dados, o que poderá influenciar significativamente os resultados. Por outro lado, os cenários com menores valores de desvio padrão, como os Cenário 14 (M3 - AT25%), Cenário 9 (M2 - AT35%) e Cenário 8 (M2 - AT30%) exibem uma dispersão mais estreita dos resultados em torno da média pois, quanto maior consistência nos valores obtidos, menor será a sensibilidade para variações nas entradas.

Os Cenários com um coeficiente de variação de Pearson (CV) mais elevado, exemplificados pelos Cenários 13 (M3 - AT30%), Cenário 3 (M1 - AT30%) e Cenário 11 (M3 - AT20%) apontam para uma dispersão relativa maior dos resultados em relação à média. Estes cenários sugerem que há uma tendência maior de variação nas entradas, o que pode resultar em um impacto mais marcante nos resultados. Contudo, a confiabilidade dos resultados é mais sólida em cenários que indicam maior consistência nas estimativas, ou seja, com menor variação relativa, como o caso dos Cenário 10 (M2 - AT40%), Cenário 15 (M3 - AT40%) e Cenário 8 (M2 - AT30%).

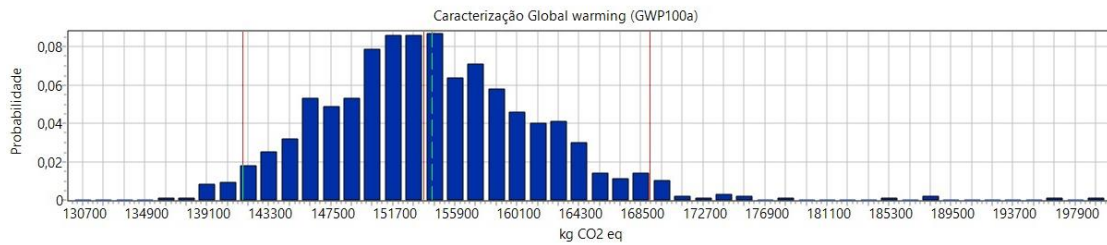
Em relação ao intervalo de confiança de 2,5% e 97,5%, significa que a faixa de variação dos resultados em torno da média é de cerca de 95% de confiança. Cenários com intervalos de 2,5% e 97,5% mais amplos, como Cenário 1 (M1 - AT20%), Cenário 6 (M2 - AT25%) e Cenário 11 (M3 - AT20%), indicam uma variabilidade mais significativa nos resultados, o que poderá ser atribuído a fatores específicos desses cenários que levam a variações mais pronunciadas. Por outro lado, cenários com intervalos mais estreitos, como Cenário 10 (M2 - AT40%), Cenário 15 (M3 - AT40%) e Cenário 8 (M2 - AT30%) sugerem maior consistência nos resultados e menor incerteza.

Além disso, o SEM pode ser usado para avaliar a confiabilidade das médias estimadas. Cenários com SEM mais baixo, indicam maior confiança nas médias como representantes da população total. Assim, os Cenários com valores de SEM mais baixos, como os Cenário 10 (M2 - AT40%), Cenário 15 (M3 - AT40%) e Cenário 8 (M2 - AT30%) indicam menor variabilidade dos resultados em relação à média, ou seja, com menos dispersão em torno da média. No entanto, os cenários com valores de SEM mais elevados, como os Cenários 1 (M1 - AT20%), 6 (M2 - AT25%) e 11 (M3 - AT20%) indicam uma variabilidade maior dos resultados em relação à média. Por isso, os resultados têm uma dispersão mais ampla, o que poderá sugerir maior incerteza nas estimativas.

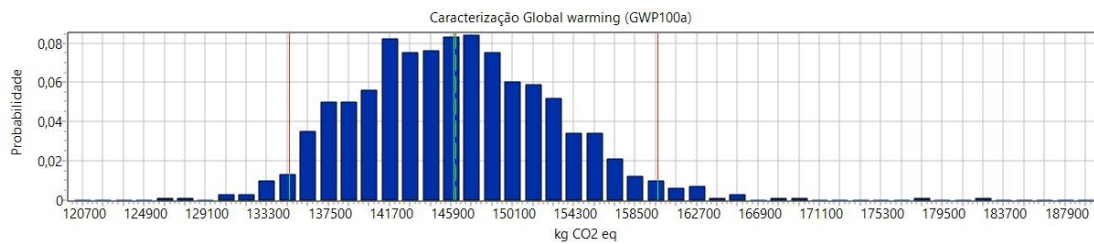
Ao avaliar o nível de incerteza em todos os cenários, observa-se que o Cenário 10 (M2 - AT40%), Cenário 15 (M3 - AT40%) e Cenário 8 (M2 - AT30%) demonstraram resultados notavelmente consistentes e previsíveis. Assim sendo, a classificação poderá ser feita, ainda que se tenha um grau inferior de incerteza, já que as estimativas apresentam uma variação mais reduzida em relação à média. Contudo, é relevante ressaltarmos que há cenários nos quais os intervalos de confiança são mais abrangentes,

acompanhados de desvio padrão (SD) e Erro Padrão da Média (SEM) mais elevados, como nos Cenário 1 (M1 - AT20%), Cenário 6 (M2 - AT25%) e Cenário 11 (M3 - AT20%). Estes cenários podem evidenciar um grau moderado de incerteza, sugerindo que os resultados podem variar de maneira mais significativa em torno da média.

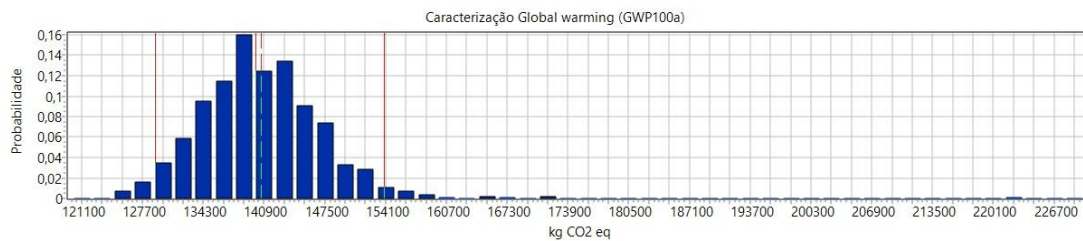
A Figura 5.30 apresenta a distribuição normal que relaciona a probabilidade no eixo Y e os valores de emissões de kg de CO₂ Eq. no eixo X. Para cada cenário, a distribuição normal apresenta o intervalo de 2,5% que indica o valor mínimo esperado, enquanto o intervalo de 97,5% indica o valor máximo esperado, ambos com uma confiança de 95%. Em relação ao eixo Y que trata da probabilidade, os valores ao longo desse eixo indicam a probabilidade de ocorrência de algum evento ou resultado associado à variável, que neste caso trata-se do impacto ambiental GWP₁₀₀. Esses valores de probabilidade variam entre 0 e 1, onde 0 representa a impossibilidade de o evento ocorrer, e 1 representa a certeza de que o evento acontecerá.



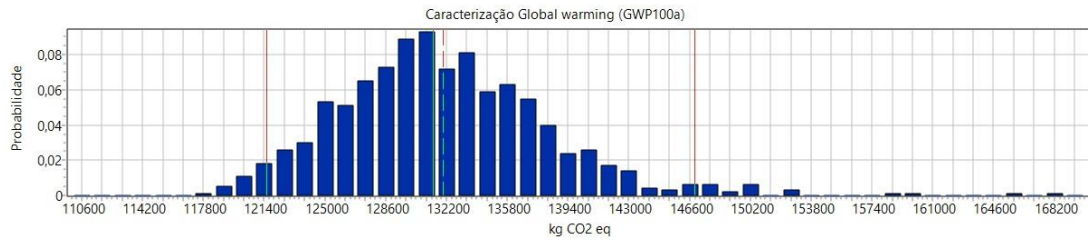
(a)



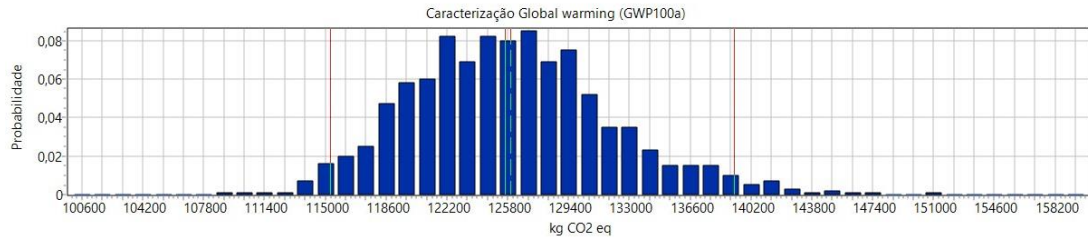
(b)



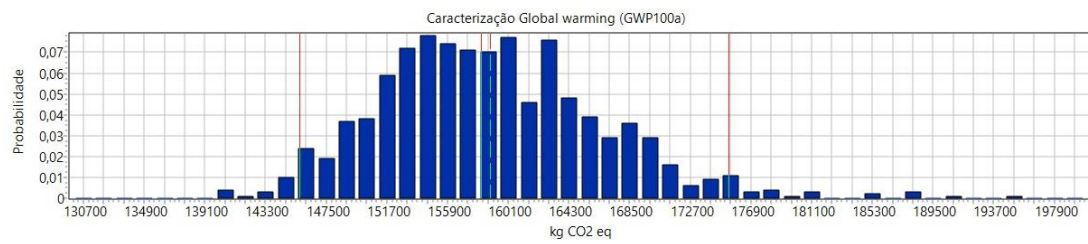
(c)



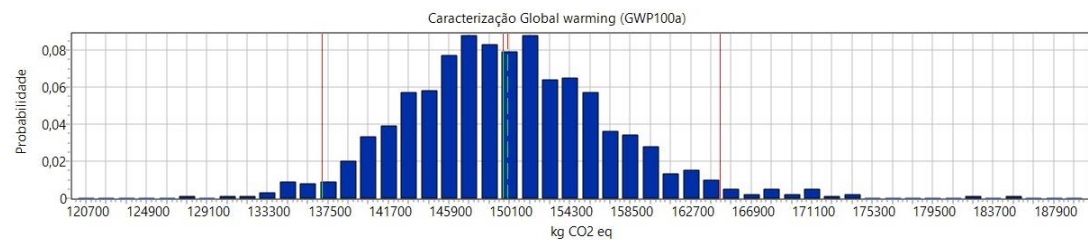
(d)



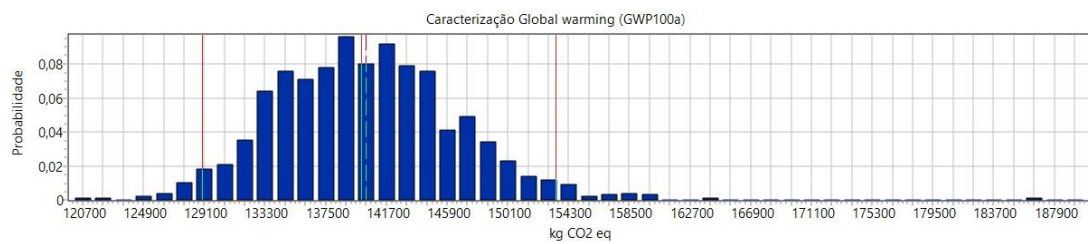
(e)



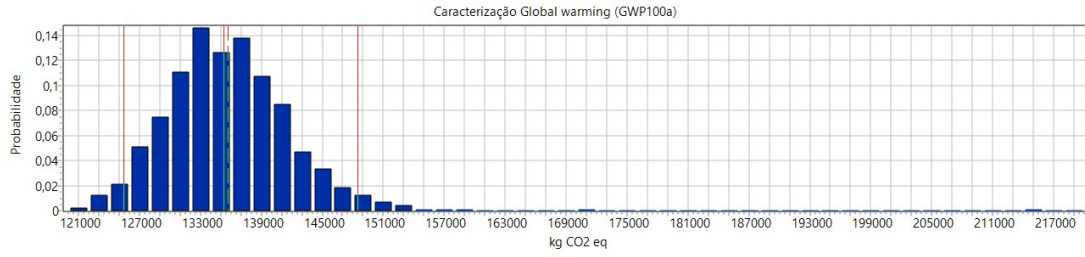
(f)



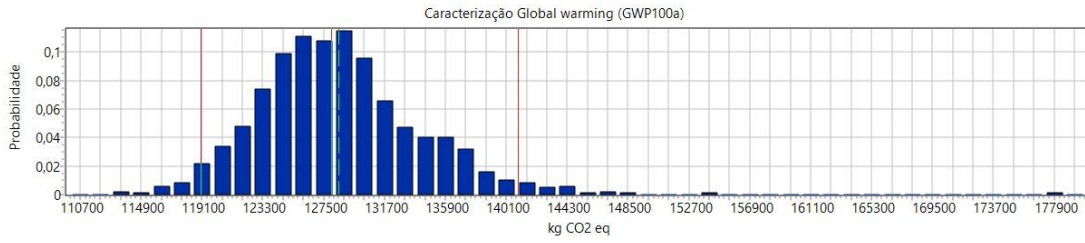
(g)



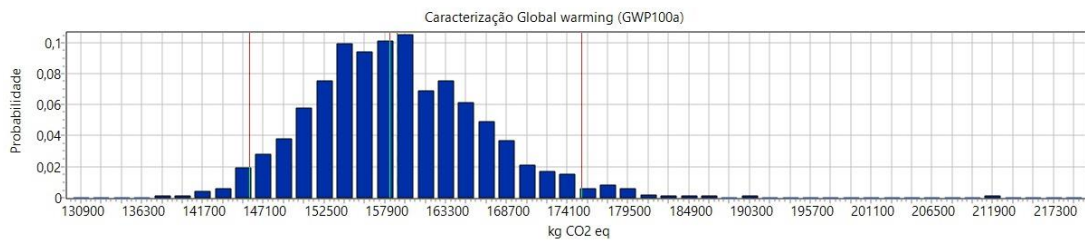
(h)



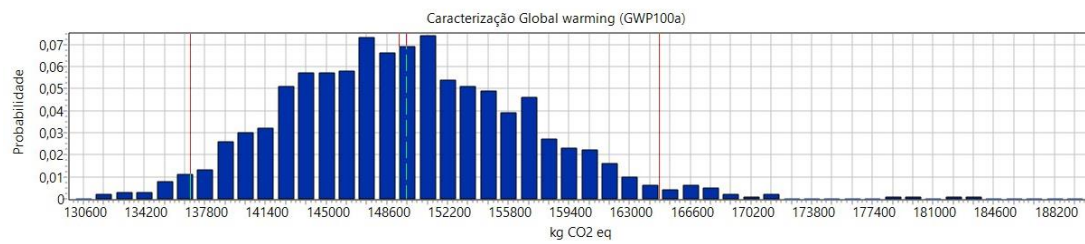
(i)



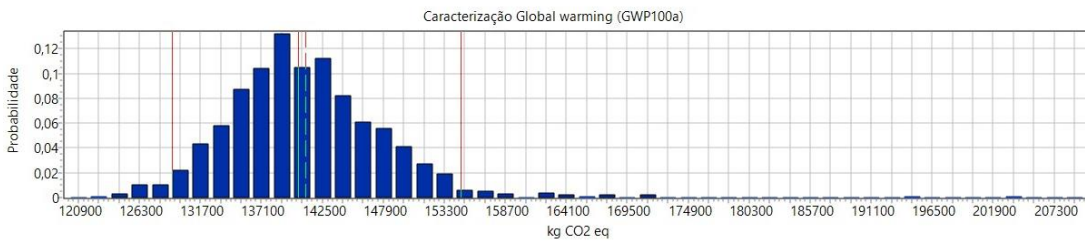
(j)



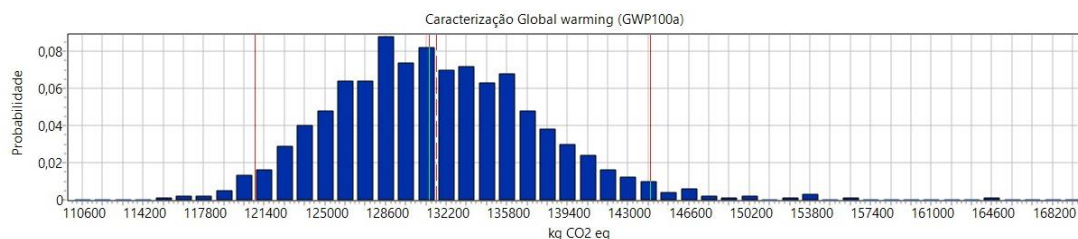
(k)



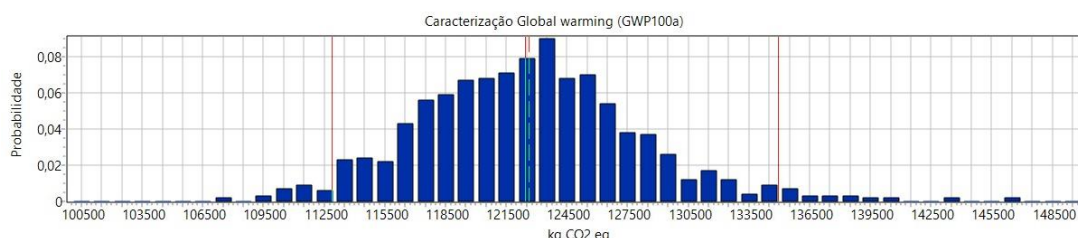
(l)



(m)



(n)



(o)

Figura 5.30 – Análise de incerteza dos cenários, por meio do GWP100a, da AICV método CML, do intervalo de confiança de 95%: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3; d) Cenário 4; e) Cenário 5; f) Cenário 6; g) Cenário 7; h) Cenário 8; i) Cenário 9; j) Cenário 10; k) Cenário 11; l) Cenário 12; m) Cenário 13; n) Cenário 14 e o) Cenário 15.

A probabilidade associada a cada cenário varia entre 0,07 e 0,16. Enquanto alguns cenários possuem probabilidades mais baixas, outros apresentam probabilidade moderada. Diante disso, alguns cenários têm maior probabilidade de ocorrer do que outros. No entanto, a probabilidade no geral é muito baixa.

Avaliando-se os cenários, observa-se que o Cenário 3, o Cenário 9 e o Cenário 13 exibem intervalos de confiança mais estreitos, indicando uma concentração mais próxima à média, bem como probabilidades relativamente altas. Esses cenários tendem a gerar impactos mais previsíveis e consistentes. Em contraste, os cenários 6, 11 e 12 têm intervalos de confiança mais amplos e probabilidades mais baixas, indicando maior incerteza associada aos impactos nesses cenários, com variações significativas em relação à média. Já os cenários 3, 6, 9, 10 e 11 apresentam intervalos de confiança que incluem valores mais altos, o que implica na possibilidade de ocorrência de impactos ambientais mais severos em situações específicas, mesmo com menor probabilidade. Logo, os cenários 1, 2, 4, 7, 8, 12, 14 e 15 possuem intervalos de confiança que englobam valores moderados, indicando uma distribuição mais centrada e uma probabilidade relativamente estável em torno da média.

Portanto, em geral, o estudo apresenta baixo grau de incerteza relacionado aos impactos ambientais GWP₁₀₀, considerando-se a análise das médias, mediana, SD, CV, intervalos de confiança e SEM. Diante disso, podemos afirmar que as estimativas dos resultados são relativamente confiáveis. Porém, é necessário considerarmos a possibilidade de variações nos valores com os intervalos mais amplos, especialmente em cada cenário específico conforme demonstrado na Figura 5.30

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais desta pesquisa, baseadas nas discussões acerca das análises apresentadas. Além disso, são expostas sugestões para o desenvolvimento de pesquisas subsequentes.

6.1 Considerações finais e limitações

O tema abordado mostrou-se relevante e com tendência de alta nas pesquisas bibliométricas realizadas. No entanto, conforme demonstrado, não encontrou-se, em termos de bibliometria, pesquisas que se referem à Análise de Ciclo de Vida que levem, em consideração, os efeitos do comportamento hidromecânico do subleito. Desse modo, verificou-se que a presença de água afeta de maneira distinta os parâmetros mecânicos de cada solo, resultando num comportamento hidromecânico. Ademais, este estudo destaca a relevância da sucção na capacidade de retenção de água desses materiais, o que, por consequência, influencia o módulo de resiliência e, por extensão, nos critérios de dimensionamento.

Primeiramente, a capacidade de retenção de água dos materiais do subleito, influenciada pela sucção e umidade, teve implicações diretas nos módulos de resiliência desses materiais, impactando nas espessuras da camada dos pavimentos. Portanto o aumento da sucção, ou seja, diminuição da umidade, ocasiona um crescimento no módulo resiliente, indicando que o material está mais propenso a suportar o carregamento.

Os indicadores propostos para avaliar o desempenho ambiental das alternativas, pela unidade funcional estabelecida, relacionam o consumo energético e a quantidade emitida de CO₂ Eq. com a vida útil dos pavimentos versus a sucção dos solos, divididos em 3 categorias: ramo seco, ramo úmido e umidade ótima. Desse modo, verificou-se que à medida que a sucção diminui o consumo energético e a emissão de CO₂ Eq. aumentam.

Os materiais selecionados para este estudo foram: solo 1 (M1), classificado como LA', composto por areias argilosas e argilas arenosas. Este material possui baixa permeabilidade; média a alta plasticidade e baixa expansão na presença de água. Este tipo de solo é considerado adequado para pavimentos devido à sua resistência e estabilidade sob carga. O solo 2 (M2), classificado como NG', abrange argilas; argilas arenosas e

argilas siltosas. Por fim, o solo 3 (M3), classificado como LG', é composto por argilas; argila arenosa, argila siltosa e siltes argilosos, e apresenta facilidade de compactação, alta coesão e baixa permeabilidade.

A combinação desses elementos possibilitou a elaboração de pavimentos com distintos períodos de vida útil, espessuras, e porcentagens de área trincada. As alternâncias nos graus de umidade dos subleitos e dos critérios de dimensionamento formam o estudo de caso para a aplicação do método proposto. A avaliação do comportamento hidromecânico é realizada pela verificação do efeito que a sucção e o módulo resiliente exercem nos solos.

O escopo do estudo englobou as fases de extração, fabricação dos materiais, usinagem e construção, considerando-se a operação dos equipamentos de engenharia. A ACV estreita seu foco na emissão de gases do efeito estufa (GEE) e na quantidade de energia primária abrangidas pelas fases mencionadas.

Ressalta-se a importância da utilização do SICRO na montagem da base de dados e levantamento dos insumos para compor o SimaPro. O SICRO possibilitou a coleta sistemática e organizada de informações precisas sobre diversos processos, materiais e atividades. Esses dados, quando inseridos no SimaPro, um *software* amplamente utilizado para ACV, permitiu uma avaliação mais completa e detalhada dos impactos ambientais. A integração do SICRO ao SimaPro oferece uma abordagem robusta para a tomada de decisões, otimizando a gestão de recursos e contribuindo para a identificação detalhada das etapas do escopo.

A respeito das razões entre o consumo energético necessário para construir 1 km de via e o comportamento da sucção nos diferentes tipos de solos, verificou-se que a faixa de 40% de AT é a que menos consome energia. No entanto, a faixa de 20% de AT é a que mais consome energia. O mesmo comportamento é observado na emissão dos gases do efeito estufa. Com base nos resultados obtidos, é possível concluirmos que na medida em que a sucção diminui e a umidade aumenta, há um acréscimo no consumo de energia requerida e na emissão de gases do efeito estufa.

Com relação ao consumo energético por tempo de vida útil por km (quilômetro) para a implantação dos pavimentos em relação à sua vida útil estimada (indicador: MJ/km/mês), foi constatado em todos os casos e com todos os critérios de

dimensionamento que os cenários com 40% de AT necessitam de maiores quantidades de energia para uma mesma extensão de via construída, enquanto os que menos consomem são os cenários com 20% de AT. Observou-se que o solo 3 (M3) a 40% de AT, ou seja, M3w2 necessita de maiores quantidades de energia, quando comparado com os outros materiais. Constatou-se que esse fenômeno pode ser explicado pelo declínio nas expectativas de vida útil que o aumento de umidade causaria.

Assim sendo, ao avaliar a emissão de CO_2_{Eq} por tempo de vida útil por km (quilômetro) para a implantação dos pavimentos em relação à sua vida útil estimada (indicador: t/km/mês), para todos os casos, os cenários que correspondem a faixa de 40% de AT são os que mais emitem CO_2_{Eq} em toneladas e os que menos emitem são os da faixa de 20% de AT. Desse modo, a respeito da contribuição que cada pavimento pode gerar para alterações climáticas, averiguou-se que todos os pavimentos intensificam seus impactos ambientais, ao passo que a umidade aumenta.

O indicador proposto para avaliar o desempenho ambiental a partir da unidade funcional versus a sucção é representado pela emissão de CO_2_{Eq} produzida por km de rodovia, dividido pela vida útil do pavimento em anos (t/km/mês) com relação à sucção do solo, dividida em três categorias: ramo seco, ramo úmido e ótimo. Cabe salientar que em sua maioria os cenários dos materiais que geram menor emissão por vida útil são aqueles compactados na umidade ótima. Observe-se que a faixa de 40% de AT exibe a emissão mais elevada de CO_2_{Eq} em comparação com todas as outras faixas, enquanto a faixa de 20% de AT registra a menor emissão de CO_2_{Eq} . Os resultados obtidos indicam que, à medida que a sucção diminui, ou seja, com o aumento da umidade, a emissão de CO_2_{Eq} também aumenta. Em última análise, pode-se concluir que a sucção é inversamente proporcional às emissões de CO_2_{Eq} e à umidade. Portanto, pode-se afirmar que o mesmo efeito é observado no indicador proposto para avaliação da energia requerida versus a sucção (MJ/km/mês versus sucção).

A análise de sensibilidade dos materiais revela que a porcentagem de área trincada no pavimento pode exercer influência sobre a quantidade de recursos necessários para a construção das vias. Nesse sentido, é possível observar que, em praticamente todos os cenários com uma área trincada de 20% (Cenário 1, Cenário 6 e Cenário 11), ocorre um impacto ambiental mais substancial. Por outro lado, em grande parte dos cenários com uma área trincada de 40% (Cenário 5, Cenário 10 e Cenário 15) os impactos ambientais

são reduzidos. É importante notar que dentre todos os cenários considerados, o solo 1 (M1) tende a resultar em emissões menores de combustível, consumo de energia e utilização de equipamentos, quando comparamos com os outros tipos de solos como o M1 e o M2.

O estudo apresenta baixo grau de incerteza relacionado aos impactos ambientais GWP_{100} , considerando-se a análise das médias, mediana, SD, CV, intervalos de confiança e SEM. Alguns cenários mostram impactos ambientais mais elevados (Cenário 3), ou mais baixos (Cenário 10), sugerindo a influência das características dos materiais do subleito e das áreas trincadas na magnitude dos impactos. Os cenários com maior probabilidade de ocorrência geralmente têm impactos mais concentrados em torno da média. Esses resultados podem orientar a tomada de decisões em termos de planejamento de infraestrutura rodoviária. Diante disso, podemos afirmar que as estimativas dos resultados são relativamente confiáveis, mas é necessário considerar a possibilidade de variações nos valores com intervalos mais amplos, especialmente em cada cenário específico.

Portanto, em todas as avaliações conduzidas nos diversos cenários que consideraram a variação do tipo de solo e a porcentagem de área trincada, os resultados demonstraram que os maiores consumos e impactos ambientais ocorreram quando a área trincada era de 20%, e os menores ocorreram quando essa área era de 40%. Essa relação pode ser explicada pelo fato de que os cenários com 20% de área trincada apresentaram maiores demandas por insumos, ou seja, maiores espessuras na camada de revestimento, enquanto os cenários com 40% tiveram consumos mais baixos, e menores espessuras na camada de revestimento.

No entanto, quando se leva em consideração o parâmetro de vida útil, como no caso da avaliação integrada dos desempenhos ambientais, os indicadores, inverte-se as estimativas, tendo-se os cenários com 40% de AT como aqueles que mais consomem energia e, por consequência, os que mais impactam o meio ambiente, enquanto os cenários com 20% de AT foram os que provocaram menor impacto.

Cabe salientarmos que em todas as instâncias onde o comportamento hidromecânico foi avaliado em relação à influência da água, medida tanto em sucção quanto em umidade, os solos que se encontravam acima da umidade ótima, ou seja, no

ramo úmido, demonstraram resultados mecânicos inferiores. Isso conseqüentemente se traduziu em maiores impactos ambientais, e em maior consumo energético quando comparados com os materiais que se encontravam no ramo seco e na umidade ótima.

Conclui-se, por fim, a partir desta tese que o comportamento hidromecânico do subleito exerce influência significativa na Análise de Ciclo de Vida (ACV) de projetos de pavimentos, pois constatou-se que a interação entre as características hidráulicas e mecânicas dos materiais do subleito desempenha um papel crucial na determinação da eficiência do pavimento ao longo de seu ciclo de vida.

6.2 Proposições para novos estudos

Baseado neste trabalho, as seguintes sugestões são propostas para futuras pesquisas:

- Avaliação econômica do efeito do comportamento hidromecânico dos materiais utilizados nos subleitos de pavimentos asfálticos;
- Avaliar o comportamento hidromecânico, bem como a sucção em outras camadas do pavimento e verificar o efeito na ACV;
- Analisar e comparar os resultados de diferentes métodos AICV: ReciPe, TRACI, Ecoindicator 99, dentre outros;
- Analisar mais etapas do escopo da ACV, como manutenção, uso, reciclagem e fim da vida útil do pavimento;
- Investigar o efeito da histerese de maneira a enriquecer a compreensão dos efeitos do comportamento hidromecânico dos solos;
- Avaliar uma variedade mais ampla de materiais de subleito. A inclusão de diferentes tipos de solos ou outros materiais utilizados como subleito poderiam enriquecer a compreensão das implicações ambientais associadas às escolhas de materiais;
- Avaliar outros impactos ambientais, tais como: esgotamento abiótico, acidificação, eutrofização, formação foto-oxidante, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS). “**Classification of soil and soil-aggregate mixtures for highway construction.**” **M-145**, Washington, DC. 2008

ABU-FARSAKH, M. Y.; MEHROTRA, A.; MOHAMMAD, L.; GASPARD, K. “Incorporating the effect of moisture variation on resilient modulus for unsaturated fine-grained subgrade soils”. **Transportation Research Record**. v. 2510, n. 1, p. 44-53, 2015. DOI: 10.3141/2510-06.

ACELEN. **Ficha de informações de segurança de produto químico**. 2021. Disponível em: <https://www.acelen.com.br/pdf/fispq/pavimentacao/ASFALTO-DILUIDO-DE-PETROLEO-CM-30.pdf>. Acesso em: 5 de julho de 2023.

ALLEN, T. J.; THOMPSON, M. R. “Resilient response of granular materials subjected do time dependent lateral stress”. **Transportation Research Record**, nº 510, p. 1 - 13, Washington, D. C., 1974.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. “A constitutive model for partially saturated soils”. **Géotechnique**, v. 40, n. 3, p. 405-430, 1990. DOI: 10.1680/geot.1990.40.3.405.

ALONSO, E. E.; PINYOL, N. M.; GENS, A. “Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling”. **Géotechnique**, v. 63, n. 6, p. 463-478, 2013. DOI: 10.1680/geot.11.P.134.

ALZARD, M. H. *et al.* “RoadCO₂: A web-based tool for estimation of greenhouse gas emissions of road projects”. **In: 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, p. 1-6. 2019. DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714341

ARA, Inc., “ERES Consultants Division. Guide for mechanistic–empirical design of new and rehabilitated pavement structures”. Final Rep., NCHRP Project 1-37A, **Transportation Research Board**, Washington, DC, 2004.

ARAÚJO, D. L. V.; SANTOS, J.; ARGUELLES, G. M. “Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction”. **International journal of pavement engineering**, v. 23, n. 4, p. 923-936, 2020. DOI: 10.1080/10298436.2020.1778694.

ARYAN, Y.; DIKSHIT, A. K.; SHINDE, A. M. “A critical review of the life cycle assessment studies on road pavements and road infrastructures”. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 117697, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117697.

ANDRADE, C. E. S. **Avaliação da emissão de dióxido de carbono e do uso de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de passageiros: aplicação na linha 4 do metrô do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2016.

AZAM, A. M.; CAMERON, D. A.; RAHMAN, M. M. "Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials". **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 11, p. 1143-1158, 2013. DOI: 10.1139/cgj-2012-0406.

AZARIJAFARI, H.; YAHIA, A.; BEN AMOR, M. "Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities", **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 4, p. 2187–2197, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.080.

BA, M.; NOKKAEW, K.; FALL, M.; TINJUM, J. M. "Effect of matric suction on resilient modulus of compacted aggregate base courses". **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, n. 5, p. 1497-1510, 2013. DOI: 10.1007/s10706-013-9674-y.

BALBO, J. T. **Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração**. Editora Oficina de Textos; 1ª edição. p. 560. São Paulo – SP, 2007.

BARANDICA, J. M. *et al.* "Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects". **Journal of cleaner production**, v. 57, p. 79-91, 2013. DOI:10.1016/j.jclepro.2013.05.036.

BERNUCCI, L. L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Escola Politécnica da Universidade São Paulo - USP. São Paulo - SP, 1995.

BARKSDALE, R. D.; HIKCS, R. G. "Material characterization and layered theory for use in fatigue analyses". Special Report n°140, **Highway Research Board - HRB**, Washington, DC, 1973.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. "Hydraulic Properties of Porous Media". **Hydrology Paper**, vol. 3, Colorado State University, Fort Collins. 1964.

BRUNDTLAND, G. H.; KHALID, M.; AGNELLI, S.; AL-ATHEL, S. A.; CHIDZERO, B.; FADIKA, L.; DE BOTERO, M. M. **Our common future**. By world commission on environment and development. London, Oxford University Press, UK, 1987, p. 383.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. vol. 1. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 1980.

BURMISTER, D. M. "Theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways". **Proc. 23rd Annual Meeting of the Highway Research Board**, 1943.

CAICEDO, B.; CORONADO, O.; FLEUREAU, J. M.; CORREIA, A. G. "Resilient behaviour of non standard unbound granular materials". **Road Materials and Pavement Design**, v. 10, n. 2, p. 287-312, 2009. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690196.

CAMAPUM, J. C.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C., GUIMARÃES, R. C., VALENCIA, Y. G. “Tropical soils highway construction: Peculiarities and considerations”. **Transportation Geotechnics Journal**, 5, p. 3–19, 2015. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.10.004.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. “Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100007.

CARY, C. E.; ZAPATA, C. E. “Resilient modulus for unsaturated unbound materials”. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 3, p. 615-638, 2011. DOI: 10.1080/14680629.2011.9695263.

CASTRO, G. B. **Avaliação da influência das condições geotécnicas e climáticas no comportamento hidromecânico de um subleito ferroviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2019.

CERATTI, J. A.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; RODRIGUES, M. R. “Influência da sucção no módulo de resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul”. **Anais da 30a Reunião Anual de Pavimentação**, Salvador-BA, Associação Brasileira de Pavimentação, p. 540 - 555, 1996.

CERATTI, A. J.; GEHLING, W. Y. Y.; NÚÑEZ, W. P. “Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in southern Brazil”. **Transportation Research Record**, v. 1874, n. 1, p. 165-173, 2004. DOI: 10.3141/1874-18.

CHEN, X.; WANG, H. “Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect”. **Journal of cleaner production**, v. 187, p. 148-157, 2018. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.03.207.

CHONG, D.; WANG, Y. “Impacts of flexible pavement design and management decisions on life cycle energy consumption and carbon footprint”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 22(6), 952-971. 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1202-x.

CHONG, D.; WANG, Y.; DAI, Z.; CHEN, X.; WANG, D.; OESER, M. “Multiobjective optimization of asphalt pavement design and maintenance decisions based on sustainability principles and mechanistic-empirical pavement analysis”. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 12, n. 6, p. 461-472, 2018. DOI: 10.1080/15568318.2017.1392657.

CHONG, D.; WANG, N.; SU, S.; LI, L. “Global warming impact assessment of asphalt pavement by integrating temporal aspects: A dynamic life cycle assessment perspective”. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 117, p. 103663, 2023. DOI:10.1016/j.trd.2023.103663.

CHU, X. “A review on the resilient response of unsaturated subgrade soils”. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, p. 1-11, 2020. DOI: 10.1155/2020/7367484.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Caderno CNT de perguntas e respostas sobre a fase P-8 do programa de controle da poluição do ar por veículos automotores - Proconve**. 2020. Despoluir – Programa Ambiental do Transporte. Confederação Nacional do Transporte (CNT). Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/0e8733db-0f86-47c2-856b-f296b1a8573f.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Pesquisa CNT rodovias 2022**. CNT: SEST, SENAT. Brasília, 2022.

COENEN, J.; BAGER, S.; MEYFROIDT, P.; NEWIG, J.; CHALLIES, E. “Environmental Governance of China’s Belt and Road Initiative”, **Environmental Policy and Governance**, v. 31, n. 1, p. 3–17. 2021. DOI: 10.1002/eet.1901.

CONG, L.; GUO, G.; YU, M.; YANG, F.; TAN, L. “The energy consumption and emission of polyurethane pavement construction based on life cycle assessment”. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120395, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120395.

CRACIUN, O.; LO, S. C. R. “Matric suction measurement in stress path cyclic triaxial testing of unbound granular base materials”. **Geotechnical Testing Journal**. v. 33, n. 1, p. 33-44, 2010. DOI: 10.1520/GTJ102390.

CRAWFORD, R. H. “Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method”. **Journal of Environmental Management**. v. 88, p. 496–506, ago. 2008. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.03.024.

CURRAN, M. A. Report on activity of task force 1: data registry-global life cycle inventory data resources. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 4, p. 284-289, 2006.

D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. 1º edição, Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.

DAWSON, A. R.; THOM, N. H.; PAUTE, J. L. “Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition”. **Flexible Pavements**, Proceedings of the Euroflex Symposium, A. G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 35–44, 1996.

DE CARVALHO, J. C.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C., GUIMARÃES, R. C., VALENCIA, Y. G. “Tropical soils highway construction: Peculiarities and considerations”. **Transportation Geotechnics Journal**, 5, p. 3–19, 2015. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.10.004.

DER/SP (DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Manual básico de estradas e rodovias vicinais**. vol. 1. Planejamento, projeto, construção e operação. São Paulo, 2012.

DNER (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM). Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: IPR, 1999. *E-book*. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/manuais/documentos/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf. Acesso em: 11 de agosto de 2022.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **Manual de pavimentação. 3º edição - Publicação IPR – 719**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **ME 134/2018. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018a.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **ME 135/2018. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018b.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **ME 136/2018. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018c.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **IE 179/2018. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018d.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **ME 183/2018. Pavimentação asfáltica – Misturas – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018e.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **ME 184/2018. Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência a deformação permanente – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2018f.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**.

Manual de Utilização do programa MeDiNa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Convênio UFRJ/DNIT. Projeto DNIT TED n° 682/2014. 2020.

DONATO, M.; GOUVEIA, B. G.; DE MEDEIROS, A. S.; DA SILVA, M. A. V.; ODA, S. “Mechanical Analysis of Subgrades of Road Pavements in Life Cycle Assessment”. **Civil Engineering Journal**, v. 8, n. 7, p. 1492-1506, 2022. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-07-012.

DRUMM, E. C.; REEVES, J. S.; MADGETT, M. R.; TROLINGER, W. D. “Subgrade resilient modulus correction for saturation effects”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 7, p. 663-670, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:7(663).

DURNER, W. “Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves”. **Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils**, p. 185-202, edited by M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, and L. J. Lund, 185–202. Riverside, CA: Univ. of California. 1992.

EC – JRC. JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment background document. **ILCD Handbook: International Reference Life Cycle Data System**. Institute for Environment and Sustainability. European Commission, 2010.

ECOINVENT. **Banco de Dados Ecoinvent: o Ecoinvent Database é um banco de dados de Inventário de Ciclo de Vida (LCI) que suporta vários tipos de avaliações de sustentabilidade.** 2023. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>. Acesso em: 18 de janeiro de 2023.

ECOINVENT 3.0. **Ecoinvent Database: Geographies.** 2023. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/geographies/>. Acesso em: 16 de junho de 2023.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. “Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils”. **Transportation Research Record**, n. 705, 1979.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.; TOHA, F. X. “Mechanical behavior and testing methods of unsaturated soils”. In: **Laboratory shear strength of soil**. ASTM International, 1981.

EDRIS, E. V.; LYTTON, R. L. “Dynamic properties of subgrade soils, including environmental effects”. **Texas A&M University.**, 1976.

EDWARDS, R.; O`CONNELL, A.; PADELLA, M.; GIUNTOLI, J.; KOEBLE, R.; BULGHERONI, C.; MARELLI, L.; LONZA, L. “Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation”. **JRC Science for Policy Report**, European Commission, v. 01, Luxembourg, 2017. DOI: 10.2790/38802.

ELLIOT, R. P.; THORNTON, S. I. “Resilient modulus and AASHTO pavement design”. **Transportation Research Record**, n. 1196, Transportation Research Board, p. 116-124, Washington, D. C., 1988.

FARRAR, M. J.; TURNER, J. P.; “Resilient modulus of wyoming subgrade soils”. **MPC Report**, No. 91-1. Department of civil and architectural engineering. The University of Wyoming. Laramie, Wyoming. 1991.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

FREDLUND, D. G. “Use of soil–water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics”. **In: Unsaturated Soils-Volume 3**. p. 887-902. CRC Press, 2004.

FREDLUND, D. G.; “Unsaturated soil mechanics in engineering practice”. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 132, n. 3, p. 286-321, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(286).

FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; SAUER, E. K. “Deformation characteristics of subgrade soils for highways and runways in Northern environments”. **Canadian Geotechnical Journal**. v.12, n.2, p. 213-223, 1975. DOI: 10.1139/t75-026.

FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; WONG, P. K. “Relation between resilient modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils.” **Transportation Research Record**, n. 462, p. 73-81, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. “The shear strength of unsaturated soils”. **Canadian geotechnical journal**, v. 15, n. 3, p. 313-321, 1978. DOI:10.1139/t78-029.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. “Soil mechanics for unsaturated soils”. **John Wiley e Sons**. 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. “Equations for the soil-water characteristic curve.” **Can. Geotech. J.**, NRC Research Press, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, 1994. DOI: 10.1139/t94-061.

FREITAS, J. B.; REZENDE, L. R.; GITIRANA JR, G. F. N. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. **Engineering Geology**, v. 270, p. 105580, 2020. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105580.

GARDNER, W. R. “Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table”. **Soil science**, v. 85, n. 4, p. 228-232, 1958.

GEHLING, W. Y. Y.; CERATTI, J. A. P.; NUM N' EZ, W. P.; RODRIGUES, M. R. “A study of the influence of suction on the resilient behavior of soils from Southern Brazil”.

Proceedings of International Conference on Unsaturated Soils. Beijing, China, v.1, p. 47-53, 1998.

GITIRANA Jr., G. F. D. N.; FREDLUND, D. G. “Soil-water characteristic curve equation with independent properties”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209-212, 2004. DOI: /10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(209).

GOUVEIA, B. G.; DONATO, M.; DA SILVA, M. A. V. “Life Cycle Assessment in Road Pavement Infrastructures: A Review”. **Civil Engineering Journal**, v. 8, n. 6, p. 1304-1315, 2022. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-06-015.

GROENEVELT, P. H.; GRANT, C. D. “A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water content”. **European Journal of Soil Science**, v. 55, n. 3, p. 479-485, 2004. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00617.x.

GU, F.; SAHIN, H.; LUO, X.; LUO, R.; LYTTON, R. L. “Estimation of resilient modulus of unbound aggregates using performance-related base course properties”. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 27, n. 6, p. 04014188, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001147.

GULOTTA, T. M.; MISTRETTA, M.; PRATICÒ, F. G. “A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads”. **Science of the total environment**, v. 673, p. 585-593, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.046.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G.; CASTRO, C. D. “Permanent deformation parameters of fine-grained tropical soils”. **Road materials and pavement design**, v. 20, n. 7, p. 1664-1681, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1473283.

GUPTA, S. C.; RANAIVOSON, A.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; SAWANGSURIYA, A. “Pavement design using unsaturated soil technology”. **Minnesota Department of Transportation**, Research Services Section, St. Paul, MN, 2007.

HASAN, U.; WHYTE, A.; JASSMI, H. AL. “Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks”. **Journal of Cleaner Production**. v. 206 541 e 558. 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.148.

HAN, Z. **Modelling Stiffness and Shear Strength of Compacted Subgrade Soils.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – University of Ottawa. Ottawa – Canadá, 2016.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. “Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soil using soil-water characteristic curve”. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 10, p. 1605-1619, 2015. DOI: 10.1139/cgj-2014-0339.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. “State-of-the-Art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils”. **International Journal of Geomechanics**, v. 16, n. 4, p. 04015104, 2016a. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000631.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. “Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils”. **Engineering geology**, v. 211, p. 85-97, 2016b. DOI: 10.1016/J. ENGGEOL.2016.06.020.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. “Stiffness and shear strength of unsaturated soils in relation to soil-water characteristic curve”. **Géotechnique**, v. 66, n. 8, p. 627-647, 2016c. DOI: 10.1680/jgeot.15.P.104.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. “Normalizing variation of stiffness and shear strength of compacted fine-grained soils with moisture content”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 9, p. 04017058, 2017. DOI: 10.1139/cgj-2016-0349.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K.; ZOU, W. “Integrated approaches for predicting soil-water characteristic curve and resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils”. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, n. 5, p. 646-663, 2017. DOI: 10.1139/cgj-2016-0349.

HARVEY, J. T.; MEIJER, J.; KENDALL, A. Tech Brief: Life Cycle Assessment of Pavements. FHWA-HIF-15-001. **Federal Highway Administration**, U.S. Department of Transportation. Washington, DC. 2014.

HAUSCHILD, M. Z.; GOEDKOOP, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; DE SCHRUYVER, A.; HUMBERT, S.; LAURENT, A.; SALA, S.; PANT, R. “Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 683-697. 2013. DOI: 10.1007/s11367-012-0489-5.

HEATH, A. C.; PESTANA, J. M.; HARVEY, J. T.; BEJERANO, M. O. “Normalizing behavior of unsaturated granular pavement materials”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 130, n. 9, p. 896-904, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130: 9(896), 896–904.

HICKS, R. G. **Factors influencing the resilient properties of granular materials**. Thesis (PhD in Engineering) - University of California, Berkeley, 1970.

HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. “Factors influencing the resilient response of granular materials”. **Highway Research Record**, n° 345, p. 15-31, 1971.

HORNYCH, P.; KAZAI, A.; PIAU, J. M. “Study of the resilient behaviour of unbound granular materials”. **Proc. Int. Conf. Bearing Capacity of Roads and Airfields**, Nordal and G. Refsdal, eds., Norwegian Univ. of Science and Technology, Trondheim, Norway, 3, 1277–1287, 1998.

HOYOS, L. R.; SUESCÚN-FLOREZ, E. A.; PUPPALA, A. J. “Stiffness of intermediate unsaturated soil from simultaneous suction-controlled resonant column and bender element testing”. **Engineering Geology**, v. 188, p. 10-28, 2015. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.01.014.

HUANG, M.; DONG, Q.; NI, F.; WANG, L. “LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance”. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124583, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124583.

HUANG, Y.; BIRD, R.; HEIDRICH, O. “Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements”. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 2, p. 283-296, 2009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.06.005.

HUPPES, G.; VAN OERS, L. “Background review of existing weighting approaches in life cycle impact assessment (LCIA)”. **European Union**. European Commission, Joint Research, Centre Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg, 2011.

INYIM, P.; PEREYRA, J.; BIENVENU, M.; MOSTAFAVI, A. “Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review”. **Journal of environmental management**, v. 176, p. 128-138, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.03.042.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). “IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories”. **The National Greenhouse Gas Inventories Programme**, IGES, Japan. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Geneva, Switzerland, p. 151. 2014.

IPEA (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA). **O Brasil na governança das grandes questões ambientais contemporâneas**. (Ana Flávia Barros-Plataiu, Org.), Texto para discussão 1618, IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Brasília, 2011.

IPEA (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA). **O uso da Análise de Ciclo de Vida (ACV) nas políticas públicas: condicionantes e estratégias de implementação da ACV no Brasil**. (Osmar Coelho Filho; Nilo Luiz Saccaro Júnior; Gustavo Luedemann, Org.). Boletim Regional, Urbano e Ambiental. IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), 2015.

IPEA (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA). **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Texto para discussão 2205. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), 2016.

- ISLAM, S; PONNAMBALAM, S. G.; LAM, H. L. “Review on life cycle inventory: methods, examples and applications”. **Journal of Cleaner Production**. v. 136. P. 266-278. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.144.
- ISO, ABNT NBR. ISO 14040: 2009. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ISO, ABNT NBR. ISO 14044: 2009. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- ISO, ABNT NBR. ISO/TR 14047: 2016. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ISO, ABNT NBR. ISO/TR 14049: 2014. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ISO, ABNT NBR. ISO/TS 14071: 2018. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044: 2009**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- JAYAKUMAR, M.; SOON, L. C. “Study on flexible pavement failures in soft soil tropical regions”. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2015. DOI: 10.1088/1757-899X/78/1/012002.
- JIANG, R.; WU, P. “Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: a critical review and future directions”. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 77, p. 148-163, 2019. DOI: 10.1016/j.trd.2019.10.010.
- JIN, S. M.; LEE, K. W.; KOVACS, W. D. “Seasonal variation of resilient modulus of soil subgrade”. **Journal of Transportation Engineering**, v. 120, n. 4, p. 603-616, 1994. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:4(603).
- JENSEN, A. A.; HOFFMAN, L.; MOLLER, B. T.; SCHMIDT, A.; CHRISTIANSEN, K.; ELKINGTON, J.; VAN DIJK, F. “Life cycle assessment: a guide to approaches experiences and information sources”. **European Environmental Agency (EEA)**, v. 17, n° 4, p. 490-507, 1997.
- JOHNSON, T. D. **The resilient moduli of subgrade soils in The East Tennessee Area**. Degree of Master of Science. University of Tennessee, Knoxville. 1986.
- JONES, M. P.; WITCZAK, M. W. “Subgrade modulus on the San Diego test road”. **Transportation Research Record**, n° 641, p. 1-6, 1977.
- KAMAL, M. A.; DAWSON, A. R.; FAROUKI, O. T.; HUGHES, D. A. B.; SHA'AT, A. A.; “Field and laboratory evaluation of the mechanical behavior of unbound granular materials in pavements”. **Transportation Research Record**, n. 1406, Transportation Research Board, p. 88-97, Washington, D. C., 1993.

KERN, C.; GEHLING, W. Y. Y.; NÚÑEZ, W. P. “Analysis of the resilience modulus of a subgrade soil front of humidity variations”. In: **MATEC Web of Conferences**. DP Sciences, v. 337, n. 03013, p. 1 - 7, 2021. DOI: 10.1051/mateconf/202133703013.

KHALILI, N. G. F. A.; GEISER, F.; BLIGHT, G. E. “Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence”. **International journal of Geomechanics**, v. 4, n. 2, p. 115-126, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:2(115).

KHOSRAVI, A.; MCCARTNEY, J. S. “Impact of hydraulic hysteresis on the small-strain shear modulus of low plasticity soils”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 11, p. 1326-1333, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000713.

KHOURY, C. N.; KHOURY, N. N.; MILLER, G. A. “Effect of cyclic suction history (hydraulic hysteresis) on resilient modulus of unsaturated fine-grained soil”. **Transportation Research Record**, v. 2232, n. 1, p. 68-75, Transportation Research Board, Washington, DC, 2011. DOI: 10.3141/2232-07.

KHOURY, N. N.; MUSHARRAF, Z. M.; NEVELS, J. B.; MANN, J. Effect of soil suction on resilient modulus of subgrade soil using the filter paper technique. In: **82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC**. 2003.

KHOURY, N.; BROOKS, R.; ZAMAN, M. M.; KHOURY, C. N. “Variations of resilient modulus of subgrade soils with postcompaction moisture contents”. **Transportation research record**, v. 2101, n. 1, p. 72-81, 2009. DOI: 10.3141/2101-09.

KHOURY, N.; BROOKS, R.; KHOURY, C.; YADA, D. “Modeling resilient modulus hysteretic behavior with moisture variation”. **International Journal of Geomechanics**, v. 12, n. 5, p. 519-527, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000140.

KHOURY, N. N.; ZAMAN, M. M. “Correlation between resilient modulus, moisture variation, and soil suction for subgrade soils”. **Transportation research record**, v. 1874, n. 1, p. 99-107, 2004. DOI:10.3141/1874-11.

KOLISOJA, P.; SAARENKETO, T.; PELTONIEMI, H.; VUORIMIES, N. “Laboratory testing of suction and deformation properties of base course aggregates”. **Transportation Research Record**, v. 1787, n. 1, p. 83-89, 2002. DOI: 10.3141/1787-09.

KOSUGI, K. “Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention”. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 891-901, 1994. DOI: 10.1029/93WR02931.

KSAIBATI, K.; ARMAGHANI, J.; FISHER, J. “Effect of moisture on modulus values of base and subgrade materials”. **Transportation research record**, v. 1716, n. 1, p. 20-29, 2000. DOI: 10.3141/1716-03.

LEE, H. C., WRAY, W. K. Techniques to evaluate soil suction - a vital unsaturated soil water variable. In: **Proceedings of the first international conference on unsaturated soil**, Paris, France: Balkema, 1995. v.2, p. 615-622.

LEE, W.; BOHRA, N. C.; ALTSCHAEFFL, A. G.; WHITE, T. D. “Resilient modulus of cohesive soils”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 2, p. 131-136, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:2(131).

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. “State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates”. **Journal of transportation engineering**, v. 126, n. 1, p. 66-75, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66).

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. “Review of soil-water characteristic curve equations”. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 123, n. 12, p. 1106-1117, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:12(1106).

LIANG, R. Y.; RABAB’AH, S.; KHASAWNEH, M. “Predicting moisture-dependent resilient modulus of cohesive soils using soil suction concept”. **Journal of Transportation Engineering**, v. 134, n. 1, p. 34-40, 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:1(34).

LI, D.; SELIG, E. T. “Resilient modulus for fine-grained subgrade soils”. **Journal of geotechnical engineering**, v. 120, n. 6, p. 939-957, 1994. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:6(939).

LI, J.; XIAO, F.; ZHANG, L.; AMIRKHANIAN, S. N. “Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review”. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 1182–1206, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.061.

LILJENSTRÖM, C.; BJÖRKLUND, A.; TOLLER, S. “Including maintenance in life cycle assessment of road and rail infrastructure—a literature review”. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, n. 2, p. 316-341, 2022. DOI: 10.0007/s11367-021-02012-x.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. “Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests”. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 2, p. 466-476, 2019. DOI: 10.1177/0361198118825124.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S.; GUIMARÃES, A. C. R. “Mechanical characterization of fine-grained lateritic soils for mechanistic-empirical flexible pavement design”. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, n. 1, 2020. DOI: 10.1520/JTE20180890.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. “A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection”. **Transportation Geotechnics**, v. 28, p. 100534, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100534.

LOACH, S. C. **Repeated loading of fine grained soils for pavement design**. Ph.D. Thesis. University of Nottingham. 1987.

LOIJOS, A. **Life Cycle Assessment of concrete pavements impacts and opportunities**. Master of Science in Technology and Policy. Department of Civil and Environmental Engineering – Massachusetts Institute of Technology - MIT. Rio de Janeiro – RJ, 2021.

LOPES, L. S. **Análise experimental do comportamento hidráulico e mecânico de um pavimento ferroviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2017.

LU, N.; KAYA, M. “Power law for elastic moduli of unsaturated soil”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 1, p. 46-56, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000990.

LU, N.; LIKOS, W. J. “Rate of capillary rise in soil”. **Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering**, v. 130, n. 6, p. 646-650, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(646).

LYTTON, R. L. “Foundations and pavements on unsaturated soils”. **In: Proceedings of the first international conference on unsaturated soils**. v.3. 1996.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 1996.

MAHABADI, N. e JANG, J. “Relative water and gas permeability for gas production from hydrate-bearing sediments”. **Geochemistry Geophysics Geosystems**, Wiley, Vol. 15, No. 6, pp. 2346-2353, 2014. DOI: 10.1002/2014GC005331.

MAHABADI, N.; ZHENG, X.; JANG, J. “The effect of hydrate saturation on water retention curves in hydrate-bearing sediment”. **Geophysical Research Letters**, Wiley, vol. 43, n.º. 9, pp. 4279-4287, 2016. DOI: 10.1002/2016GL068656.

MAHABADI, N.; DAI, S.; SEOL, Y.; YUN, T. S.; JANG, J. “The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate-bearing sediments: Pore-network model simulation”. **Geochemistry Geophysics Geosystems**, Wiley, Vol. 17, No. 8, pp. 3099-3110, 2016. DOI: 10.1002/2016GC006372.

MALLA, R. B.; JOSHI, S. “Establish subgrade support values for typical soils in New England”. NETCR 57, NETC Project n. 02-3, **The New England Transportation Consortium, University of Connecticut, Storrs**, 2006.

MARINHO, F. A. M. “Medição de sucção em solos”. **In: III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Rio de Janeiro, RJ, v.2, p. 373-397. 1997.

MARMITT, H. M. **Caracterização de propriedades resilientes três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2002.

MAY, R. W.; WITCZAK, M. W. “Effective granular modulus to model pavement responses”. **Transportation Research Board**, v. 810, p. 1-9, 1981.

MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. “Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas”. **SPE formation evaluation**, v. 2, n. 04, p. 599-608, 1987. DOI: 10.2118/14447-PA.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3º edição, Editora. Interciência, Rio de Janeiro, 2015.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. “Características Resilientes de Solos em Estudos de Pavimentos”. **Solos e Rochas. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, Rio de Janeiro, RJ., vol 3, n 1, p. 3-26, 1980.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. “Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos”. **Revista Production**, 26(1), 160-175. 2016. DOI: 10.1590/0103-6513.153213.

MENEZES, L. C. A.; GUIMARÃES, A. C. R.; CASTRO, C. D. “Estudo da influência do perfil da plataforma ferroviária submetida à água da chuva no seu comportamento estrutural”. In: **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**. Balneário Camboriú – SC. 2019

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **1º Inventário Nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. 2014. Disponível em: <https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/2014-05-27inventario2013.pdf>. Acesso em: 1 de agosto de 2023.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 1991.

NASCIMENTO, F., GOUVEIA, B., DIAS, F., *et al.* “A method to select a road pavement structure with life cycle assessment”, **Journal of Cleaner Production**, v. 271, n. 122210, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122210.

NASCIMENTO, F. A. C. **Alguns aspectos operacionais e ambientais incorporados a um sistema de gerenciamento de pavimentos aeroportuários: uma contribuição metodológica à luz da análise do ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2021.

NAZARIAN, S.; YUAN, D. “Variation in moduli of base and subgrade with moisture”. **GeoCongress 2008: Geosustainability and geohazard mitigation**. p. 570-577, 2008. DOI: 10.1061/40971(310)71.

NEVES, E. M. **Mecânica dos estados críticos: solos saturados e não saturados**. 1ª ed. - Lisboa: IST Press, p. 528, 2016.

NG, C. W. W.; YUNG, S. Y. “Determination of the anisotropic shear stiffness of an unsaturated decomposed soil”. **Geotechnique**, v. 58, n. 1, p. 23-35, 2008. DOI: 10.1680/geot.2008.58.1.23.

NG, C. W.; ZHOU, C.; YUAN, Q.; XU, J. “Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations”. **NRC Research Press**, published on 7 March 2013. *Canadian Geotechn. J.* 50: pp. 223-232. 2012.

NG, C. W. W.; ZHOU, C.; YUAN, Q.; XU, J.; “Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations”. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 2, p. 223-232, 2013. DOI: 10.1139/cgj-2012-0052.

NG, C. W. W.; ZHOU, C. “Cyclic behaviour of an unsaturated silt at various suctions and temperatures”. **Géotechnique**. v. 64, n. 9, p. 709-720, 2014. DOI: 10.1680/geot.14.P.015.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. “Estudos geotécnicos e de drenagem aplicados à pavimentação”. **In: Reunião Anual de Pavimentação**, v.2, pp. 465-484, 1983.

NOKKAEW, K.; TINJUM, J. M.; LIKOS, W. J.; EDIL, T. B. “Effect of matric suction on resilient modulus for compacted recycled base course in postcompaction state”. **Transportation Research Record**. v. 2433, n. 1, p. 68-78, 2014. DOI: 10.3141/2433-08.

OH, J. H.; FERNANDO, E. G.; HOLZSCHUHER, C.; HORHOTA, D. “Comparison of resilient modulus values for Florida flexible mechanistic-empirical pavement design”. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 13, n. 5, p. 472-484, 2012.

OH, W. T.; VANAPALLI, S. K.; PUPPALA, A. J. “Semi-empirical model for the prediction of modulus of elasticity for unsaturated soils”. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 8, p. 903-914, 2009. DOI: 10.1139/T09-030.

OH, W. T.; VANAPALLI, S. K. “Interpretation of the bearing capacity of unsaturated fine-grained soil using the modified effective and the modified total stress approaches”. **International Journal of Geomechanics**, v. 13, n. 6, p. 769-778, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000263.

OLOO, S. Y. “The application of unsaturated soil mechanics theory to the design of pavements”. **In: Proc. 1st Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, BCRA'98**. p. 1419-1428. Tapir Academic Press, Trondheim, Norway. 1998.

OOI, P. S. K.; SANDEFUR, K. G.; ARCHILLA, A. R. “Correlation of resilient modulus of fine-grained soils with common soil parameters for use in design of flexible pavements”. **HWY-L-2000-06**, Hawaii department of Transportation, Honolulu, 2006.

OSORTO, M. R. R.; CASAGRANDE, M. D. T. Environmental Impact Comparison Analysis between a Traditional Hot Mixed Asphalt (HMA) and with the Addition of Recycled Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (RPET) through the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1102, 2023. DOI: 10.3390/su15021102.

PARREIRA, A. B.; GONÇALVES, R. F. “The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil”. **In: ISRM International Symposium. ISRM, 2000**. p. ISRM-IS-2000-397.

PARREIRA, A. B.; CUNTO, F. J. C.; CARMO, C. A. T.; RODRIGUES, J. K. G. “O módulo de resiliência de alguns materiais de pavimentação e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples”. **In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Anais, Brasília, vol. 1, p. 149-155, 1998.

PLATI, C.; TSAKOUMAKI, M. “Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Pavement Rehabilitation Solutions: A Case Study”. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2129, 2023. DOI: 10.3390/su15032129.

PHILLIP, A. W. **The relation between resilient modulus and suction of fine grained soil in pavement design**. Master of Civil Engineering. University of South Australian, 1996.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 1983.

QIAN, J.; LI, J.; ZHOU, D.; LING, J. “Prediction model of resilient modulus for unsaturated clay soils considering the effect of matric suction”. **Rock and Soil Mechanics**. v. 39, n. 1, p. 1-6, 2018. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0239.

RAAD, L.; MINASSIAN, G.; GARTIN, S. “Characterization of saturated granular bases under repeated load”. **Transportation research record**, nº 1369, p. 73-82, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1992.

RADA, C.; WITCZAK, W. M. “Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular material”. **Transportation Research Record**. Transportation Research Board, Washington, D. C., n. 810, p. 23-33, 1981.

RIDLEY, A. M.; WRAY, W. K. “Suction measurement: a review of current theory and practices”. **In: Proceedings of the first international conference on unsaturated soils**. pag. 1293 – 1322. Paris, Alonso and Delage eds, Balkema, Rotterdam, 1995.

RODRIGUES, M. R. **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 1997.

ROELFSEMA, M. *et al.* “Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement”. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 2096, 2020. DOI:10.1038/s41467-020-15414-6.

ROUDEBUSH, W. H. “Environmental value engineering (EVE) Environmental life cycle assessment of concrete and asphalt highway pavement systems”. **Portland Cement Association: Skokie, IL**, 1996.

SALEM, H. M.; BAYOMY, F. M.; AL-TAHER, M. G. “Prediction of seasonal variation of subgrade resilient modulus using LTPP Data”. **Presented at 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., 2003.

SAHIN, H.; GU, F.; TONG, Y.; LYTTON, R. L. "Unsaturated soil mechanics in the design and performance of pavements". **Advances in Unsaturated Soils**, v. 1, p. 87, 2013.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S.; ZAPATA, C. E. "Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control". **Canadian Geotechnical Journal**. v. 51, n. 12, p. 1413-1422, 2014. DOI: 10.1139/cgj-2013-048.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. "Resilient modulus modelling of unsaturated subgrade soils: laboratory investigation of silty sand subgrade". **Road Materials and Pavement Design**, v. 16, n. 3, p. 553-568, 2015. DOI: 10.1080/14680629.2015.1021107.

SANTERO, N. "Life cycle assessment of pavements: a critical review of existing literature and research". SN3119a, **Portland Cement Association**, p. 81. Skokie, Illinois, USA, 2010.

SANTOS, J.; FERREIRA, A.; FLINTSCH, G. "A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework". **International Journal of Pavement Engineering**. v. 16, n. 3, p. 268-286. 2015a. DOI:10.1080/10298436.2014.942861.

SANTOS, J.; BRYCE, J.; FLINTSCH, G.; FERREIRA, A.; DIEFENDERFER, B. "A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices". **Structure and Infrastructure Engineering**. v. 11, n. 9, p. 1199-1217. 2015b. DOI: 10.1080/15732479.2014.945095.

SANTOS, J.; BRESSI, S.; CERESO, V.; LOPRESTI, D. "SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements". **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 424-540, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.308.

SAUER, E. K.; MONISMITH, C. L. "Influence of soil suction on behavior of a glacial till subjected to repeated loading". **Highway Research Record**. v. 215, p. 8-23, 1968.

SAWANGSURIYA, A.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. "Effect of suction on resilient modulus of compacted fine-grained subgrade soils". **Transportation research record**, v. 2101, n. 1, p. 82-87, 2009a. DOI: 10.3141/2101-10.

SAWANGSURIYA, A.; EDIL, T. B.; BOSSCHER, P. J. "Modulus-suction-moisture relationship for compacted soils in postcompaction state". **Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 10, p. 1390-1403, 2009b. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000108.

SEED, H. B.; CHAN, C. K.; LEE, C. E. "Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements". **In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements**. Supplement University of Michigan, Ann Arbor. 1962.

SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. “Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests”. **NCHRP Report 35, Transportation Research Board**, Washington, United States, 1967a.

SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. “Factors influencing the resilient deformations of untreated aggregate base in two-layer pavements subjected to repeated loading”. **Highway Research Record**, v. 190, p. 19-57, 1967b.

SICRO 2 (SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2021. **Manuais de Custo. Volume 3 – Equipamentos**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

SICRO 3 (SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2023. **Banco de dados do estado do Rio de Janeiro para o mês de janeiro de 2022**. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sudeste/espírito-santo/2022/outubro/outubro-2022. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

SILVA, B. A. **Aplicação das metodologias MCT e resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia - IME. Rio de Janeiro – RJ, 2003.

SILVA, B. A. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo - USP. São Carlos – SP, 2005.

SILVA, A. M. **Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

SILVA, M. F.; RIBEIRO, M. M. P.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P. “Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil”. **Transportation Geotechnics**, v. 26, p. 100443, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100443.

SIMAPRO. **Behind the Scenes at Monte Carlo Simulations**. 2023a. Disponível em: <https://support.simapro.com/s/article/Behind-the-Scenes-at-Monte-Carlo-Simulations>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

SIMAPRO. **Finding your way in multifunctional processes and recycling**. 2022. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/articles/finding-your-way-in-allocation-methods-multifunctional-processes-recycling/>. Acesso em: 04 de julho de 2023.

SIMAPRO. **What are unit and system processes?**. 2023b. Disponível em: <https://support.simapro.com/s/article/What-are-unit-and-system-processes>. Acesso em: 05 de julho de 2023.

SIMAPRO. **What is the difference between ecoinvent market and transformation processes?**. 2023c. Disponível em: <https://support.simapro.com/s/article/What-is-the-difference-between-ecoinvent-market-and-transformation-processes>. Acesso em: 07 de julho de 2023.

SÍRIO, D. L. N.; BARBASSA, A. P.; ZUQUETTE, L. V. “Análise experimental e validação de curvas bimodais de retenção de água no solo para solos areno-argilosos residuais da formação itaqueri em São Carlos–SP”. **Geosciences=Geociências**, v. 39, n. 04, p. 1041-1057, 2020. DOI:10.5016/geociencias.v39i04.14354.

SIVAKUMAR, V.; KODIKARA, J.; O'HAGAN, R.; HUGUES, D.; CAIRNS, P.; MCKINLEY, J. D. “Effects of confining pressure and water content on performance of unsaturated compacted clay under repeated loading”. **Geotechnique**. v. 63, n. 8, p. 628-640, 2013. DOI: 10.1680/geot.10.P.103.

SOUZA, L. P. **Uso integrado das ferramentas de análise do ciclo de vida e de análise do custo do ciclo de vida em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2017.

STRIPPLE, H. “Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis”. **IVL Swedish Environmental Research Institute**. Swedish National Road Administration. Second revised edition. 2001.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 1980.

SWEERE, G. T. H. **Unbound granular bases for roads**. Thesis (PhD in Civil Engineering) - University of Delft, 1990.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade São Paulo (USP). São Carlos, SP, 2006.

TIAN, P.; ZAMAN, M. M.; LAGUROS, J. G. “Gradation and moisture effects on resilient moduli of aggregate bases”. **Transportation Research Record**, vol. 1619, no. 1, p. 75–84, 1998. DOI:10.3141/1619-09.

THOM, R.; SIVAKUMAR, V.; BROWN, J.; HUGHES, D. “A simple triaxial system for evaluating the performance of unsaturated soils under repeated loading”. **Geotechnical Testing Journal**. v. 31, n. 2, p. 107-114, 2008. DOI: 10.1520/GTJ100963.

TOO, V. K.; OMUTO; C. T.; BIAMAH, E. K.; OBIERO, J. P. “Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness”. **Open**

Journal of Modern Hydrology, v. 4, n. 04, p. 173, 2014. DOI: 10.4236/ojmh.2014.44017.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E.; CLIFTON, A. W. “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”. **Canadian geotechnical journal**, v. 33, n. 3, p. 379-392, 1996. DOI: 10.1139/t96-06.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. “The influence of soil structure and stress history on the soil–water characteristics of a compacted till”. **Géotechnique**, v. 49, n. 2, p. 143-159, 1999. DOI: 10.1680/geot.1999.49.2.143.

VANAPALLI, S. K.; HAN, Z. “Prediction of the resilient modulus of unsaturated fine-grained soils”. **In: Proceedings of International Conference on Advances in Civil Engineering**, AETACE. 2013.

VANAPALLI, S. K.; MOHAMED, F. M. “Bearing capacity of model footings in unsaturated soils”. **In: Experimental unsaturated soil mechanics**. Springer Berlin Heidelbergp. 483-493. 2007.

VAN DAM, T. J.; HARVEY, J. T.; MUENCH, S. T.; SMITH, K. D.; SNYDER, M. B.; AL-QADI, I. L.; OZER, H.; MEIJER, J.; RAM, P. V.; ROESLER, J. R.; KENDALL, A. **Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document**. FHWA-HIF-15-002. Federal Highway Administration, Washington, DC, 2015.

VAN GENUCHTEN, M. T. “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” **Soil Science Society of American Journal**, Digital Library, vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

VARGAS, G. A. B. **Simulação numérica do comportamento mecânico de um Pavimento asfáltico instrumentado submetido a diferentes condições de saturação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2020.

VEGA ARAÚJO, D. L.; SANTOS, J., MARTINEZ-ARGUELLES G. “Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction”. **International Journal of Pavement Engineering**. v. 23, n. 4, p. 923-936, 2020. DOI:10.1080/10298436.2020.1778694.

VILLIBOR, D. F. e NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. Editora Arte & Ciência, São Paulo, 2009.

WERK, S. M. S. **Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2000.

WHYTE, A. **Life-cycle cost analysis of built assets-LCCA framework**. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, German. 2011.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R. E.; WILLIAMS, W. T.; HIGNETT, C. T. “The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic”. **Soil Research**, v. 21, n. 1, p. 15-32, 1983. DOI: 10.1071/SR9830015.

WITCZAK, M. W.; UZAN, J. **The universal airport design system. Report I of V: Granular Material Characterization.** University of Maryland, College Park, MD, Department of Civil Engineering, 1988.

WU, S.; GRAY, D. H.; RICHART JR, F. E. “Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts”. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, n. 9, p. 1188-1203, 1984. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:9(1188).

YANG, S. R.; HUANG, W. H.; TAI, Y. T. “Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils”. **Transportation Research Record 1913, Transportation Research Board**, Washington, DC, 99–106, 2005. DOI: 10.1177/0361198105191300110.

YANG, S. R.; LIN, H. D.; KUNG, J. H.; HUANG, W. H. “Suction-controlled laboratory test on resilient modulus of unsaturated compacted subgrade soils”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 134, n. 9, p. 1375-1384, 2008. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:9(1375)

YAO, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, J.; PENG, J.; LI, J. “Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soils in south China”. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 6, p. 2089-2098, 2018. DOI: 10.1007/s12205-018-1703-1.

ZAPATA, C. E.; ANDREI, D.; WITCZAK, M. W.; HOUSTON, W. N. “Incorporation of environmental effects in pavement design”. **Road Materials and Pavement Design**. v. 8, n. 4, p. 667-693, 2007. DOI: 10.1080/14680629.2007.9690094.

ZHANG, J.; PENG, J.; ZHENG, J.; YAO, Y. “Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in South China”. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 1, p. 262-275, 2018. DOI:10.1080/14680629.2018.1481138.

ZHEMCHUZHNIKOV, A. **Influence of clay content and suction on the strength of compressed earth blocks.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC Rio. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

APÊNDICE A

No APÊNDICE A, serão apresentados os resultados dos ensaios, bem como os dados para complementar a seção 5.4.

A.1 Ajuste da Curva Característica

A elaboração da curva característica de sucção por Van Genuchten bimodal é um processo que envolve a determinação dos parâmetros do modelo de Van Genuchten, que é um modelo empírico amplamente utilizado para descrever o comportamento do solo em relação à retenção de água e à sucção. Os resultados de sucção (ψ) e umidade (α) foram obtidos em laboratório. Assim, na Tabela A.1 são apresentados os parâmetros de Van Genuchten dos solos utilizados neste estudo, juntamente com as equações A.1 e A.2 que permitem obter a curva característica de sucção por meio desses parâmetros.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad \text{(Equação A.1)}$$

$$m = n - \frac{1}{n} \quad \text{(Equação A.2)}$$

Em que,

θ : umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

θ_r : umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

θ_s : umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

ψ : potencial matricial (hPa);

α : Parâmetro empírico de ajuste da curva (hPa^{-1});

n, m : parâmetros empíricos da função.

Tabela A.1 - Parâmetros de Van Genuchten.

Material	θ_r	θ_s	α	n	m
Solo 1	18	27,8	0,02	2,5	1,3
Solo 2	20	27,8	0,02	2	1,5
Solo 3	18	24,2	0,02	1,6	0,975

A.2 Dados da caracterização hidráulica dos materiais do subleito

A Tabela A.2 apresenta os resultados dos ensaios de sucção, na qual obtivemos sucção e umidade realizados na panela de Richards para os três solos investigados neste

estudo. Para a elaboração dos corpos de prova, os materiais foram compactados na energia *Proctor Normal* e na umidade ótima.

Tabela A.2 – Dados para elaboração da curva característica.

Sucção (kPa)	Umidade (%) (Solo 1)	Umidade (%) (Solo 2)	Umidade (%) (Solo 3)
3,00	27,76	27,81	24,17
9,81	21,73	25,92	23,64
49,03	20,36	24,09	21,86
98,07	19,80	23,37	21,19
490,33	18,60	20,79	18,99
980,67	17,94	19,68	17,99
1471,00	17,51	19,09	17,78

A.3 Dados de sucção, umidade (ótima, ramo seco e úmido) e módulo resiliente (M_R)

Os resultados dos ensaios de módulo resiliente na umidade ótima, no ramo seco e no ramo úmido estão apresentados nas Tabelas A.3, A.4 e A.5. A sucção correspondente a cada umidade foi obtida por interpolação a partir da Tabela A.2, buscando-se o valor que melhor representasse cada caso.

Tabela A.3 – Solo 1: Sucção versus umidade.

	Umidade (%)	Sucção (kPa)	M_R (MPa)
ótimo	21,15	26,34	164,49
seco	18,00	936,22	121,46
úmido 1	21,65	12,01	55,57
úmido	24,20	7,02	43,54

Tabela A.4 – Solo 2: Sucção versus umidade.

	Umidade (%)	Sucção (kPa)	M_R (MPa)
ótimo	22,73	195,53	144,95
seco	20,00	840,06	147,41
úmido 1	23,20	123,96	71,57
úmido	25,20	25,26	55,07

Tabela A.5 – Solo 3: Sucção versus umidade.

	Umidade (%)	Sucção (kPa)	M_R (MPa)
ótimo	21,08	117,72	136,43
seco	19,50	399,84	120,16
úmido 1	21,75	56,80	78,34
úmido	24,50	2,30	46,11

A.4 Dimensionamento de pavimentos

Os pavimentos foram projetados por meio do método mecanístico-empírico, utilizando-se o *software* MeDiNa. A Tabela A.6 apresenta as espessuras dos materiais estudados, tanto nas perspectivas obtidas pelo *software* quanto nas espessuras adotadas para o desenvolvimento desta pesquisa. Normalmente, as espessuras adotadas são arredondadas em incrementos de 5 cm para um número maior, a fim de torná-las compatíveis com as condições reais do campo e facilitar a execução do projeto.

Tabela A.6 – Espessura dos pavimentos.

%AT	Solo 1 - LA'		Solo 2 - NG'		Solo 3 - LG'	
	Espessura Calculada	Espessura Adotada	Espessura Calculada	Espessura Adotada	Espessura Calculada	Espessura Adotada
20	12,5	12,5	12,9	13,0	12,9	13,0
25	11,4	11,5	11,7	12,0	11,7	12,0
30	10,7	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
35	9,7	10,0	10,1	10,5	10,0	10,0
40	9,1	9,5	9,5	9,5	8,9	9,0

A.5 Quantitativo de material para construção da via

A Tabela A.7 apresenta o quantitativo de material por camada para cada cenário na construção de 1 km de via com largura de pista de 7,20 m, sem acostamento e imprimação. O projeto inclui camadas de base com espessura de 15 cm, sub-base com espessura de 30 cm e subleito com espessura de 20 cm. Além disso, o serviço de terraplenagem foi realizado para conformação do subleito.

Tabela A.7 – Quantidade de materiais para construção de 1 km de via (contínua).

Cenários	AT (%)	e (cm)	Revestimento (t)	Imprimação (m ²)	Base (m ³)	Sub-base (m ³)	Subleito (m ³)
Cenário 1	20%	12,50	2160,00	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 2	25%	11,50	1987,20	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 3	30%	11,00	1900,80	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 4	35%	10,00	1728,00	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 5	40%	9,50	1641,60	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 6	20%	13,00	2246,40	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 7	25%	12,00	2073,60	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 8	30%	11,00	1900,80	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 9	35%	10,50	1814,40	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 10	40%	9,50	1641,60	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 11	20%	13,00	2246,40	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 12	25%	12,00	2073,60	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 13	30%	11,00	1900,80	7200,00	1080,00	2160,00	720,00

Tabela A.7 – Quantidade de materiais para construção de 1 km de via (continuação).

Cenários	AT (%)	e (cm)	Revestimento (t)	Imprimação (m ²)	Base (m ³)	Sub-base (m ³)	Subleito (m ³)
Cenário 14	35%	10,00	1728,00	7200,00	1080,00	2160,00	720,00
Cenário 15	40%	9,00	1555,20	7200,00	1080,00	2160,00	720,00

A.6 Quantidades de insumos obtidas SICRO (2023)

O SICRO 3 (Sistema de Custos Rodoviários) vai além de ser apenas uma tabela de preços para obras rodoviárias, pois representa um abrangente conjunto de variáveis que são consideradas durante a formação dos preços, levando-se em conta a significativa variação regional e temporal desses valores. Essa variação é influenciada pela disponibilidade dos insumos nas diferentes regiões, bem como pelas distâncias dos centros de produção até o local da obra. Além disso, aspectos econômicos, como o nível de investimento em obras na região, também são levados em consideração.

Uma das suas principais vantagens é a possibilidade de observar a taxa de produtividade de cada equipamento utilizado na execução das obras rodoviárias. Essa informação é valiosa para otimizar a escolha dos equipamentos e garantir uma gestão mais eficiente dos recursos durante o processo de construção das vias. Em suma, o SICRO 3 é uma ferramenta fundamental para o setor de obras rodoviárias, pois não apenas apresenta os preços dos serviços, mas, também, proporciona uma estimativa mais precisa e abrangente.

Além disso, existem diversos *softwares* disponíveis no mercado que utilizam o SICRO 3 como base para a realização de cálculos relacionados a obras rodoviárias e orçamentos. Para simplificar o levantamento do quantitativo de materiais necessários, foi adotado o uso do *software* "90 Compor" por meio de uma licença paga. Esse *software* permitiu o cálculo detalhado dos insumos necessários para cada uma das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação dos serviços para cada cenário, conforme apresentado nas Tabelas A.8 a A.26. Dessa forma, a utilização dessa ferramenta proporcionou maior agilidade e precisão na estimativa dos materiais necessários para cada etapa do projeto de pavimentação.

Tabela A.8 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 1.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.160,00	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	139,31	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.965,40	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	123.819,84	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	123,82	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	866,83	t
	M0028	Areia média	1.073,25	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	1.073,25	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	22,23	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	22,12	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	8,70	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	22,12	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	22,12	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	44.064,00	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	15,40	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	17,78	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	21,69	h

Tabela A.9 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 2.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.987,20	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	128,16	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.408,20	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	113.914,25	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.139,14	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	797,48	t
	M0028	Areia média	987,39	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	14.810,78	tkm

1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	20,45	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	20,35	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	8,01	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	20,35	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	20,35	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	40.538,89	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	15,40	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	17,78	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	21,69	h

Tabela A.10 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 3.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.900,80	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	122,59	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.129,55	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	108.961,46	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.089,61	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	762,81	t
	M0028	Areia média	944,46	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	14.166,83	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	19,56	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	19,47	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	7,66	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	19,47	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	19,47	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	38.776,31	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	13,55	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	15,65	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	19,08	h

Tabela A.11 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 4.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.728,00	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	111,45	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5.572,35	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	99.055,87	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	990,56	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	693,46	t
	M0028	Areia média	858,60	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	12.878,94	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	17,78	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	17,70	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,96	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	17,70	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	17,70	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	35.251,22	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	12,32	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	14,23	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	17,35	h

Tabela A.12 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 5.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.641,60	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	105,87	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5293,7	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	94.103,08	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	941,03	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	658,79	t
	M0028	Areia média	815,67	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	12.234,99	tkm

1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	8,56	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	16,81	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,61	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	16,81	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	16,81	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	33.488,64	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	11,70	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	13,52	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	16,48	h

Tabela A.13 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 6.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.246,40	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	144,88	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	7.244,05	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	128.772,63	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.287,73	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	901,50	t
	M0028	Areia média	1.116,18	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	16.742,63	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	23,12	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	23,01	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	9,05	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	23,01	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	23,01	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	45.826,57	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	16,01	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	18,49	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	22,55	h

Tabela A.14 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 7.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.073,60	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	133,74	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.686,80	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	118.867,05	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.188,67	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	832,15	t
	M0028	Areia média	1.030,32	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	15.454,73	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	21,34	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	21,24	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	8,36	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	21,24	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	21,24	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	42.301,44	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	14,78	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	17,07	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	20,82	h

Tabela A.15 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 8.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.900,80	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	122,59	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.129,55	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	108.961,46	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.089,61	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	762,81	t
	M0028	Areia média	944,46	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	14.166,83	tkm

1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	19,56	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	19,47	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	7,66	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	19,47	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	19,47	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	38.776,31	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	13,55	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	15,65	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	19,08	h

Tabela A.16 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 9.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.814,40	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	117,02	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5.850,95	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	104.008,67	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.040,09	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	728,14	t
	M0028	Areia média	901,53	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	13.522,89	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	18,67	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	18,58	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	7,31	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	18,58	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	18,58	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	37.013,77	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	12,93	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	14,94	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	18,22	h

Tabela A.17 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 10.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.641,60	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	105,87	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5.293,70	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	94.103,08	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	941,03	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	658,79	t
	M0028	Areia média	815,67	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	12.234,99	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	16,89	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	16,81	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,61	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	16,81	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	16,81	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	33.488,64	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	11,70	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	13,52	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	16,48	h

Tabela A.18 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 11.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.246,40	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	144,88	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	7.244,05	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	128.772,63	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.287,73	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	901,50	t
	M0028	Areia média	1.116,18	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	16.742,63	tkm

1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	23,12	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	23,01	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	9,05	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	23,01	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	23,01	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	45.826,57	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	16,01	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	18,49	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	22,55	h

Tabela A.19 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 12.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	2.073,60	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	133,74	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.686,80	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	118.867,05	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.188,67	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	832,15	t
	M0028	Areia média	1.030,32	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	15.454,73	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	21,34	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	21,24	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	8,36	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	21,24	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	21,24	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	42.301,44	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	14,78	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	17,07	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	20,82	h

Tabela A.20 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 13.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.900,80	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	122,59	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	6.129,55	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	108.961,46	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	1.089,61	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	762,81	t
	M0028	Areia média	944,46	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	14.166,83	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	19,56	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	19,47	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	7,66	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	19,47	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	19,47	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	38.776,31	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	13,55	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	15,65	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	19,08	h

Tabela A.21 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 14.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.728,00	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	111,45	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5.572,35	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	99.055,87	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	990,56	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	693,46	t
	M0028	Areia média	858,60	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	12.878,94	tkm

1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	17,78	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	17,70	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,96	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	17,70	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	17,70	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	35.251,22	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	12,32	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	14,23	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	17,35	h

Tabela A.22 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 15.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	4011463	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	1.555,20	t
1.1 Extração e fabricação	M1943	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	100,30	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do CAP (Usina até o local da construção)	5.015,10	tkm
	M0344	Cal hidratada - a granel	89.150,29	kg
	E9146	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	891,50	tkm
	M0005 / M0191 / M1103	Brita produzida em central de britagem	624,12	t
	M0028	Areia média	772,74	t
	IT0353	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	11.591,04	tkm
1.2 Usinagem	E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	16,00	h
	E9021	Grupo gerador - 456 kVA	15,93	h
	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,27	h
	E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	15,93	h
	E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	15,93	h
1.3 Transporte da Usina para obra	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	31.726,07	tkm
1.4 Construção do Pavimento	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	11,09	h
	E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	12,80	h
	E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	15,61	h

Tabela A.23 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
2. Imprimação	4011351	Imprimação com asfalto diluído	7.200,00	m²
2.1 Extração e fabricação	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	4,32	t
	M0104	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	4,32	t
	-	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	345,60	tkm
2.2 Imprimação da Camada	E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	12,80	h
	E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	6,40	h

Tabela A.24 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
3. Base	4011256	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.	1.080,00	m³
3.1 Extração	M0191	Brita 1	668,41	t
	E9515	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	1.559,64	t
3.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	7.798,20	tkm
3.3 Usinagem (Usina de solo)	E9765	Grupo gerador - 569 kVA	6,71	h
	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	44.561,02	tkm
3.4 Construção da Camada	E9524	Motoniveladora - 93 kW	7,16	h
	E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	6,16	h
	E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	6,44	h
	E9577	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	4,44	h
	E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	5,94	h

Tabela A.25 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de sub-base – Todos os cenários.

Etapa	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
4. Sub-base	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	2.160,00	m³
4.1 Extração	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	4.455,00	t
4.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	44.550,00	tkm
	E9524	motoniveladora - 93 kW	9,54	h

4.3 Construção da camada	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	9,25	h
	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	9,63	h
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	6,65	h
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	11,94	h

Tabela A.26 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de subleito – Todos os cenários.

Etapas	Cód. SICRO	Descrição	Quantidade de material	Unidade
4. Subleito	-	-	720,00	m³
4.1 Extração	E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	1.485,00	t
4.2 Transporte	E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	2.227,50	tkm
4.3 Construção da camada	E9524	motoniveladora - 93 kW	3,18	h
	E9762	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	3,08	h
	E9685	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	3,21	h
	E9577	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	2,22	h
	E9571	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	3,98	h

A.7 Banco de dados para alimentar o *software* SimaPro e conversão das unidades

Para alimentar o *software* SimaPro, utilizou-se os dados obtidos pelo SICRO (2023a), os quais foram adaptados para a base de dados Ecoinvent. Durante esse processo, identificou-se que algumas unidades de medida dos insumos (produtos ou processos) não eram equivalentes, o que exigiu a realização de conversões apropriadas. Neste sentido, abaixo serão descritas as atividades específicas que necessitaram de conversão de unidades.

Nas Tabelas A.28 a A.46, estão apresentados os quantitativos ajustados após as devidas conversões, assegurando-se a consistência e a precisão dos dados utilizados no SimaPro. É relevante destacarmos que todos os cenários compartilham das mesmas camadas de imprimação, base, sub-base e subleito, ou seja, os mesmos materiais e processos, além dos quantitativos de insumos. Contudo, a única camada que possui

variação na espessura é o revestimento. Diante disso, os materiais e os processos permanecem idênticos, com alterações apenas nos quantitativos.

Essa etapa é essencial para obtermos resultados confiáveis e significativos em análises de ciclo de vida e avaliações de sustentabilidade. Ao compatibilizarmos os dados do SICRO com a base de dados Ecoinvent, e realizarmos as devidas conversões de unidades, garantimos uma abordagem sólida e consistente para a avaliação do desempenho ambiental dos produtos e processos considerados neste estudo.

- **Conversão de unidades**

a) Equipamentos - conversão de produtividade em hora para energia:

No SICRO a unidade de medida da produção mecânica é em hora. Os equipamentos são estimados quanto ao tempo de operação, e avaliam a produtividade e a improdutividade. Por outro lado, o SimaPro utiliza a unidade de medida em energia (MJ), que representa a energia consumida ou gerada pelos equipamentos. Assim, para a conversão de unidade foram utilizados os seguintes procedimentos descritos abaixo.

A potência dos equipamentos é fornecida pelo DNIT através dos Manuais de Custo, Volume 3 - Equipamentos (SICRO 2, 2021). Esses manuais são uma referência oficial para a estimativa de custos e caracterização dos equipamentos utilizados em obras de infraestrutura, disponibilizando informações detalhadas sobre as especificações técnicas, capacidades e potências dos diversos tipos de equipamentos utilizados em projetos rodoviários (Tabela A.27).

O cálculo do tempo de operatividade do equipamento é baseado na produção mecânica do serviço de pavimentação que, por sua vez, depende do quantitativo de material necessário para o tamanho do pavimento a ser construído. O tempo de operatividade é obtido a partir da base de dados do SICRO 3.

Tabela A.27 – Potência dos equipamentos utilizados no inventário.

Equipamento	Potência (kWh)
Grupo gerador - 456 kVA	365
Grupo gerador - 569 kVA	455
Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	12

Com base na potência dos equipamentos e no tempo de operatividade, utilizou-se a equação A.3 para calcular a energia.

$$P = \frac{E}{t} \quad \text{(Equação A.3)}$$

Em que:

P: potência, em kWh;

E: energia, em J;

t: tempo, em h.

O resultado da energia é expresso em kWh. A conversão das unidades foi realizada para compatibilizar o inventário no SimaPro, considerando que 1 kWh equivale a 3,6 MJ.

b) Conversão da unidade de peso dos materiais

Alguns materiais foram fornecidos pelo SICRO (2023) em toneladas, sendo necessário convertê-los para quilogramas, onde 1 tonelada equivale a 1000 kg.

c) Massa convertida em volume

Para efetuar a conversão da massa em volume, empregou-se a equação A.4. A massa, inicialmente em toneladas, foi fornecida pelo SICRO e necessitou ser convertida para volume, expresso em metros cúbicos (m³), para ser inserida no SimaPro. A densidade, também conhecida como massa específica, foi obtida a partir do Manuais de Custos, Volume 10 – Manuais Técnicos (SICRO 2, 2021). Para esse estudo específico, utilizou-se a massa específica solta de 1,500 toneladas por metro cúbico (t/m³) para a conversão de unidades nas atividades descritas abaixo (Figura A.1):

- camada de base: E9515 - Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m³.
- camada de sub-base e subleito: E9515 - Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m³ - 118 kW.

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{(Equação A.4)}$$

Em que:

d: densidade, em t/m³;

m: massa, em t;

v: volume, em m³.

Figura A.1 – Massas específicas referenciais dos solos e agregados.

Materiais	Massa Especifica Natural (t/m ³)	Massa Especifica Solta (t/m ³)	Massa Especifica Compactada (t/m ³)
Materiais de 1ª categoria	1,875	1,500	2,063
Materiais de 2ª categoria	2,085	1,500	2,085
Materiais de 3ª categoria	2,630	1,500	2,100
Solos	1,875	1,500	2,063
Brita	2,630	1,500	2,100
Areia	-	1,500	1,725

Fonte: SICRO 2, 2021.

Tabela A.28 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 1.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	139.308,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.965,40	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	123.819,84	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.238,20	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	866.827,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.073.245,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	16.098,68	tkm
	1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,23
Combustível		Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	29.065,68	MJ
Combustível		Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	14.255,51	MJ
Combustível		Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	955,58	MJ
Combustível		Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	20.704,32	MJ

1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	44.064,00	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,40	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,78	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	21,69	h

Tabela A.29 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 2.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	128.164,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.408,20	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	113.914,25	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.139,14	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	797.481,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	987.385,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	14.810,78	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	20,45	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	26.741,21	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	13.115,47	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	879,16	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	19.048,54	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	40.538,89	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,40	h

Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,78	h
Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	21,69	h

Tabela A.30 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 3.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação			
	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	122.591,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.129,55 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	108.961,46 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.089,61 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	762.808,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	944.455,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	14.166,83 tkm
1.2 Usinagem			
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,56 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	25.578,32 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	12.545,44 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	840,93 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	18.220,18 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	38.776,31 tkm
1.4 Construção do Pavimento			
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,55 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,65 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,08 h

Tabela A.31 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 4.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	111.447,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.572,35	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	99.055,87	kg
1.1 Extração e fabricação	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	990,56	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	693.462,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	858.596,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	12.878,94	tkm
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,78	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	23.252,54	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	11.403,76	MJ
1.2 Usinagem	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	764,47	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	16.563,46	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	35.251,22	tkm
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,32	h
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,23	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,35	h

Tabela A.32 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 5.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento				
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	105.874,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5293,7	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	94.103,08	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	941,03	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	658.789,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	815.666,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	12.234,99	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	8,56	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	22.090,97	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	10.833,73	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	726,28	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	15.736,03	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	33.488,64	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	11,70	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,52	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,48	h

Tabela A.33 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 6.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento				
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	144.881,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	7.244,05	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	128.772,63	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.287,73	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	901.500,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.116.175,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	16.742,63	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	23,12	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	30.228,57	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	14.825,54	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	993,82	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	21.532,68	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	45.826,57	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,01	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,49	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,55	h

Tabela A.34 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 7.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	133.736,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.686,80	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	118.867,05	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.188,67	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	832.154,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.030.315,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	15.454,73	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	21,34	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	27.904,10	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	13.685,49	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	917,40	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	19.876,90	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	42.301,44	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,78	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,07	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	20,82	h

Tabela A.35 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 8.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	122.591,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.129,55 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	108.961,46 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.089,61 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	762.808,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	944.455,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	14.166,83 tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,56 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	25.578,32 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	12.545,44 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	840,93 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	18.220,18 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	38.776,31 tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,55 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,65 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,08 h

Tabela A.36 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 9.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	117.019,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.850,95 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	104.008,67 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.040,09 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	728.135,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	901.526,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	13.522,89 tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,67 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	24.415,43 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	11.973,78 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	802,70 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	17.391,82 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	37.013,77 tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,93 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,94 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,22 h

Tabela A.37 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 10.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação			
	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	105.874,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.293,70 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	94.103,08 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	941,03 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	658.789,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	815.666,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	12.234,99 tkm
1.2 Usinagem			
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,89 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	22.090,97 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	10.833,73 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	726,28 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	15.736,03 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra			
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	33.488,64 tkm
1.4 Construção do Pavimento			
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	11,70 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,52 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,48 h

Tabela A.38 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 11.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento				
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	144.881,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	7.244,05	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	128.772,63	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.287,73	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	901.500,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.116.175,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	16.742,63	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	23,12	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	30.228,57	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	14.825,54	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	993,82	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	21.532,68	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	45.826,57	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,01	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	18,49	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	22,55	h

Tabela A.39 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 12.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	133.736,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.686,80	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	118.867,05	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.188,67	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	832.154,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	1.030.315,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	15.454,73	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	21,34	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	27.904,10	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	13.685,49	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	917,40	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	19.876,90	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	42.301,44	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,78	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,07	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	20,82	h

Tabela A.40 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 13.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento				
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	122.591,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	6.129,55	tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	108.961,46	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1.089,61	tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	762.808,00	kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	944.455,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	14.166,83	tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,56	h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	25.578,32	MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	12.545,44	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	840,93	MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	18.220,18	MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	38.776,31	tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	13,55	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,65	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	19,08	h

Tabela A.41 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 14.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	111.447,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.572,35 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	99.055,87 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	990,56 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	693.462,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	858.596,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	12.878,94 tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,78 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	23.252,54 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	11.403,76 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	764,47 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	16.563,46 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	35.251,22 tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,32 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	14,23 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	17,35 h

Tabela A.42 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de revestimento – Cenário 15.

Etapas	SimaPro: Base de dados Ecoinvent	Quantidade de material	Unidade
1. Revestimento			
1.1 Extração e fabricação	Material	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	100.302,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	5.015,10 tkm
	Material e Transporte	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	89.150,29 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	891,50 tkm
	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	624.115,00 kg
	Material	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	772.736,00 kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	11.591,04 tkm
1.2 Usinagem	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	16,00 h
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	20.928,08 MJ
	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	10.263,71 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	688,05 MJ
	Combustível	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	14.907,67 MJ
1.3 Transporte da Usina para obra	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	31.726,07 tkm
1.4 Construção do Pavimento	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	11,09 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,80 h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	15,61 h

Tabela A.43 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação e execução do serviço de imprimação – Todos os cenários.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
2. Imprimação				
2.1 Extração e fabricação	Material e Transporte	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	4.320,00	kg
	Material e Transporte	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	4.320,00	kg
	Transporte	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	345,60	tkm
2.2 Imprimação da Camada	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	12,80	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6,40	h

Tabela A.44 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, usinagem, construção e operação para construção da camada de base – Todos os cenários.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
3. Base				
3.1 Extração	Material e Transporte	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	668.412,00	kg
	Material e Transporte	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	1.039,76	m ³
3.2 Transporte	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	7.798,20	tkm
3.3 Usinagem (Usina de solo)	Combustível	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	10.992,62	MJ
	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	44.561,02	tkm
3.4 Construção da Camada	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	7,16	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6,16	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6,44	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4,44	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5,94	h

Tabela A.45 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de sub-base – Todos os cenários.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
4. Sub-base				
4.1 Extração	Material	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	2.970,00	m ³
4.2 Transporte	Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	44.550,00	tkm
4.3 Construção da camada	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,54	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,25	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	9,63	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6,65	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	11,94	h

Tabela A.46 – Quantidade de materiais das etapas de extração, fabricação, construção e operação da camada de subleito – Todos os cenários.

Etapa	SimaPro: Base de dados Ecoinvent		Quantidade de material	Unidade
4. Subleito				
4.1 Extração	Material e Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	990,00	m ³
4.2 Transporte	Transporte	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2.227,50	tkm
4.3 Construção da camada	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3,18	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3,08	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3,21	h
	Operação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2,22	h
	Operação	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3,98	h

A.8 Alterações climáticas GWP₁₀₀: Impacto ambiental gerado pela infraestrutura

A partir dos resultados do SimaPro obteve-se os resultados de impacto ambiental medido pelo indicador GWP₁₀₀ que avalia o potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa, tendo como unidade emissão em CO₂ equivalente. Logo, as Tabelas A.47 a A.65 apresentam as quantidades de gases de efeito estufa emitida na fabricação dos

insumos e no funcionamento dos equipamentos de engenharia na construção por quilômetro de pista construída para cada camada do pavimento e cenário estudado nesta pesquisa.

Tabela A.47 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 1.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	70543,6174
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	1653,6133
	Cal hidratada - a granel	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	690,7971
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	147,5592
	Brita produzida em central de britagem	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	6462,0941
	Areia média	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	7422,3233
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3821,8899
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	3272,6714
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2637,3573
	Grupo gerador - 569 kVA	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1293,5143
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	90,4626
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1960,0320
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5251,2095
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2267,1678
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2617,5483

Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3193,1733
--	--	-----------

Tabela A.48 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 2.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	64900,4521
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	1521,3319
	Cal hidratada - a granel	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	635,5333
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	135,7540
	Brita produzida em central de britagem	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	5945,1278
	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	6828,5347
1.2 Usinagem	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3516,1374
	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3010,6222
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2426,4399
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1190,0695
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	83,2281
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1803,2830
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	4831,1139
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2266,8734
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2617,9899
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3192,7317

Tabela A.49 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 3.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	62078,3630
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1455,1793
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	607,9014
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	129,8514
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5686,6446
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	6531,6403
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3363,2611
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2879,5975
	Grupo gerador - 456 kVA	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	2320,9217
	Grupo gerador - 569 kVA	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1138,3462
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	79,6090
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1724,8640
	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4621,0631
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1994,8132
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2303,9725
		Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2808,9326

Tabela A.50 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 4.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	56435,1977
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1322,8978
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	552,6376
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	118,0473
	Brita produzida em central de britagem		5169,6783
	Areia média		5937,8586
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		3057,5110
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2617,5483
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2109,8855
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1034,7526
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	72,3707
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1568,0260
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW		4200,9700
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1813,7342
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2094,9219
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2554,2442

Tabela A.51 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 5.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	53613,1087
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	1256,7452
	Cal hidratada - a granel	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	525,0058
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	112,1447
	Brita produzida em central de britagem	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	4911,1951
	Areia média	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5640,9643
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2904,6347
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1260,1920
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2004,4871
	Grupo gerador - 569 kVA	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	983,0294
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	68,7553
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1489,6950
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3990,9192
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1722,4586
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1990,3967
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2426,1640

Tabela A.52 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 6.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	73365,7064
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1719,7659
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	718,4289
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	153,4618
	Brita produzida em central de britagem		6720,5773
	Areia média		7719,2176
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		3974,7661
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3403,6961
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2742,8754
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1345,2376
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	94,0827
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2038,4510
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5461,2590
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2356,9712
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2722,0735
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3319,7814

Tabela A.53 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 7.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	67722,0347
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1587,4726
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	663,1652
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	141,6566
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6203,6110
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	7125,4290
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3669,0136
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3141,6468
	Grupo gerador - 456 kVA	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	2531,9580
	Grupo gerador - 569 kVA	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1241,7919
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	86,8482
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1881,7020
		Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5041,1611
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2175,8922
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2513,0230
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3065,0931

Tabela A.54 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 8.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	62078,3630
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1455,1793
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	607,9014
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	129,8514
	Brita produzida em central de britagem		5686,6446
	Areia média		6531,6403
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		3363,2611
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2879,5975
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2320,9217
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1138,3462
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	79,6090
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1724,8640
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	4621,0631
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1994,8132
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2303,9725
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2808,9326

Tabela A.55 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 9.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	59256,7804
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1389,0385
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	580,2696
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	125,0225
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5428,1615
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	6234,7529
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3210,3872
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2748,5729
	Grupo gerador - 456 kVA	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2215,4036
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1086,4750
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	75,9898
1.3 Transporte da Usina para obra	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1646,4450
	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	4411,0171
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1903,5376
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2199,4472
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2682,3245

Tabela A.56 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 10.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	53613,1087
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1256,7452
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	525,0098
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	112,1447
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4911,1951
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	5640,9643
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2904,6347
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2486,5236
	Grupo gerador - 456 kVA	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2004,4871
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	983,0294
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	68,7553
1.3 Transporte da Usina para obra	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3170,2951
	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3990,9192
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1722,4586
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1990,3967
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2426,1640

Tabela A.57 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 11.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	73365,7064
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1719,7659
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	718,4289
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	153,4618
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	6720,5773
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	7719,2176
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3974,7661
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3403,6961
	Grupo gerador - 456 kVA	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2748,3197
	Grupo gerador - 569 kVA	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1345,2376
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	94,0827
1.3 Transporte da Usina para obra	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2038,4510
	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5461,2590
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2356,9712
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2722,0735
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3319,7814

Tabela A.58 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 12.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	67722,0347
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1587,4726
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	663,1652
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	141,6566
	Brita produzida em central de britagem		6203,6110
	Areia média		7125,4290
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		3669,0136
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3141,6468
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2531,9580
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1241,7919
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	86,8482
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1881,7020
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5041,1611
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2175,8922
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2513,0230
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	3065,0931

Tabela A.59 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 13.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	62078,3630
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1455,1793
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	607,9014
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	129,8514
	Brita produzida em central de britagem	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	5686,6446
	Areia média	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	6531,6403
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	3363,2611
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	2879,5975
	Grupo gerador - 456 kVA	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	2320,9217
	Grupo gerador - 569 kVA	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1138,3462
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	79,6090
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1724,8640
	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	4621,0631
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1994,8132
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2303,9725
		Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2808,9326

Tabela A.60 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 14.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	56435,1977
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	1322,8978
	Cal hidratada - a granel	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	552,6376
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	118,0473
	Brita produzida em central de britagem		5169,6783
	Areia média		5937,8586
	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		3057,5110
1.2 Usinagem	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2617,5483
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	2109,8855
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1034,7526
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	72,3707
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1568,0260
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	4200,9700
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1813,7342
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2094,9219
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2554,2442

Tabela A.61 – Impacto ambiental gerado pela camada de revestimento – Cenário 15.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
1. Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70		kg CO ₂ eq
1.1 Extração e fabricação	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	50791,5260
	O SICRO não quantifica o transporte do CAP		1190,6044
	Cal hidratada - a granel		497,3739
	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW		106,2421
	Brita produzida em central de britagem	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	4652,7045
	Areia média	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5344,0700
1.2 Usinagem	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW		2751,7584
	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2355,4990
	Grupo gerador - 456 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	1898,9690
	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	931,3070
	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	65,1362
	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	1411,2760
1.3 Transporte da Usina para obra	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	3780,8696
1.4 Construção do Pavimento	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1632,6552
	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1884,3992
	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	2298,0837

Tabela A.62 – Impacto ambiental gerado pela camada de imprimação – Todos os cenários.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
2. Imprimação	Imprimação com asfalto diluído		kg CO ₂ eq
2.1 Extração e fabricação	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	2187,5874
	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	1792,8183
	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	20,5117
2.2 Imprimação da Camada	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1884,3992
	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	942,1996

Tabela A.63 – Impacto ambiental gerado pela camada de base – Todos os cenários.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
3. Base	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.		kg CO ₂ eq
3.1 Extração	Brita 1	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	4982,9335
	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	552,1562
3.2 Transporte	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	929,3291
3.3 Usinagem (Usina de solo)	Grupo gerador - 569 kVA	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	997,4465
	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5310,4405
3.4 Construção da Camada	Motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1053,7914
	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	906,2782

Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	948,3828
Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	653,3565
Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	874,6262

Tabela A.64 – Impacto ambiental gerado pela camada de sub-base – Todos os cenários.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
4. Sub-base	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.		kg CO ₂ eq
4.1 Extração	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	1577,1962
4.2 Transporte	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	5309,1272
	Motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1403,7302
	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1361,1840
4.3 Construção da Camada	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1417,8632
	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	978,4154
	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	1758,2328

Tabela A.65 – Impacto ambiental gerado pela camada de subleito – Todos os cenários.

Etapa	Descrição	Itens da biblioteca Ecoinvent	Impacto Ambiental
4. Subleito	-		kg CO ₂ eq
4.1 Extração	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica de 1,56 m ³	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	525,7321

4.2 Transporte	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	265,4564
4.3 Construção da Camada	Motoniveladora - 93 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	467,8610
	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	453,7280
	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	472,5720
	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	326,0894
	Caminhão tanque com capacidade de 10.0001 - 188 kW	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	586,0776

A.9 Itens classificados em categorias

A Tabela A.66 ilustra a representação das diferentes categorias, como Combustível (Diesel), Energia, Equipamentos, Escavação de jazida, Material e Transporte.

Tabela A.66 – Itens distribuídos em categorias.

Categoria	Item da biblioteca Ecoinvent	Etapa	Camada
Combustível (Diesel)	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	Grupo gerador - 456 kVA	Revestimento
	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	Grupo gerador - 569 kVA	Revestimento
	Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	Grupo gerador - 569 kVA	Base
Energia	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	Revestimento
	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW APOS, U	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	Revestimento
Equipamentos	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m ³ - 113 kW	Revestimento

Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Revestimento
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	Revestimento
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	Revestimento
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	Imprimação
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	Imprimação
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Motoniveladora - 93 kW	Base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	motoniveladora - 93 kW	Sub-base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Sub-base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Sub-base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Sub-base
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Sub-base

	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	motoniveladora - 93 kW	Subleito
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	Subleito
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido por pneus de 11,6 t - 82 kW	Subleito
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	trator agrícola sobre pneus - 77 kW	Subleito
	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor {GLO} market for APOS, U	caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	Subleito
Escavação de jazida	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	Base
	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	Sub-base
	Excavation, hydraulic digger {GLO} market for APOS, U	Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba com capacidade de 1,56 m ³ - 118 kW	Subleito
Material	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	Brita produzida em central de britagem	Revestimento
	Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed APOS, U	Brita 1	Base
	Kerosene {BR} market for kerosene APOS, U	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (querosene)	Imprimação
	Limestone, crushed, washed {RoW} market for limestone, crushed, washed APOS, U	Cal hidratada - a granel	Revestimento
	Sand {BR} sand quarry operation, open pit mine APOS, U	Areia média	Revestimento
	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	Cimento asfáltico de petróleo - CAP 50/70	Revestimento
	Bitumen adhesive compound, hot {GLO} market for APOS, U	Asfalto diluído de petróleo - CM-30 (betume)	Imprimação
Transporte	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão silo com capacidade de 30 m ³ - 265 kW	Revestimento

Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Revestimento
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	O SICRO não quantifica o transporte do CAP	Revestimento
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Transporte da areia média - Caminhão basculante 10 M ³ - 188 kW	Revestimento
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 APOS, U	O SICRO não quantifica o transporte do asfalto diluído (Usina até o local da construção)	Imprimação
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Base
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Base
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Sub-base
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR} transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 APOS, U	Caminhão basculante com capacidade de 10 m ³ - 188 kW	Subleito

A.10 Tabela Resumo da caracterização física e mecânica dos materiais para o subleito

A Tabela A.67 apresenta a junção dos resultados das caracterizações físicas e mecânicas, bem como a classificação dos solos para a aplicação no subleito dos pavimentos estudados.

Tabela A.67 – Dados do ensaio mecânico dos solos e classificação de acordo com o MCT.

Cenários	Classificação MCT	¹ MEAS (g/cm ³)	Umidade (%)	Ramo	k ₁	k ₂	k ₃	R ²	σ ₃ (MPa)	σ _d (MPa)	M _R (MPa)
1	Solo 1 - LA'	1,71	21,15	ótimo	122,439	0,160	-0,240	0,76	0,072	0,071	164,49
2			18,00	seco	67,732	0,188	-0,369	0,79	0,053	0,051	121,46
3			21,65	úmido 1	60,107	0,376	-0,302	0,89	0,053	0,051	55,57
4			24,20	úmido 2	56,716	0,348	-0,249	0,73	0,038	0,035	43,54
5	Solo 2 - NG'	1,67	22,73	ótimo	153,970	0,323	-0,268	0,60	0,053	0,051	144,95
6			20,00	seco	123,706	0,152	-0,206	0,56	0,073	0,071	147,41
7			23,20	úmido 1	150,588	0,582	-0,273	0,90	0,073	0,071	71,57
8			25,20	úmido 2	76,155	0,386	-0,254	0,81	0,053	0,05	55,07
9	Solo 3 - LG'	1,71	21,08	ótimo	80,888	0,232	-0,354	0,64	0,053	0,051	136,43
10			19,50	seco	354,146	0,496	-0,061	0,58	0,052	0,051	120,16
11			21,75	úmido 1	37,815	0,240	-0,457	0,88	0,053	0,051	78,34
12			24,50	úmido 2	31,656	0,212	-0,382	0,96	0,038	0,07	46,11

¹ MEAS: Massa específica aparente seca.

ANEXO I

I. Caracterização dos materiais (revestimento, base e sub-base)

Os dados apresentados nas Tabelas I, II e III, correspondem à caracterização física e mecânica dos materiais das camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base. Essas informações foram obtidas pelo próprio *software* MeDiNa.

Tabela I – Propriedades mecânicas do revestimento.

Nome do material	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Tipo de material	Concreto asfáltico
Coef. Poisson	0,3
Módulo Resiliente (MPa)	8289
Massa específica (g/cm³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	1,91
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de Vazios (%)	5,0
Diâmetro máximo do agregado (mm)	12,5
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
k₁ Fad	3,0x10 ⁻¹³
k₂ Fad	-3,78
Classe de Fadiga	1
FFM	0,73

Tabela II– Propriedades mecânicas da base.

Nome do material	Solo Brita - M4 (NG' s:1494)
Tipo de material	Solo estabilizado granulometricamente
Coef. Poisson	0,35
k₁ M_R	325,7
k₂ M_R	0,35
k₃ M_R	-0,55
k₄ M_R	0
Massa específica (g/cm³)	2,065
Umidade Ótima (%)	6,9
Energia de compactação	Intermediária
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
k₁ ¹DP	0,24
k₂ ¹DP	-0,34
k₃ ¹DP	1,37
k₄ ¹DP	0,04

¹DP: Deformação permanente.

Tabela III: Propriedades mecânicas da sub-base.

Nome do material	Solo NG' (s: 1494)
Tipo de material	Solo argiloso não laterítico
Coef. Poisson	0,45
k₁ M_R	135,20
k₂ M_R	0,260
k₃ M_R	-0,650
k₄ M_R	0
Massa específica (g/cm³)	1,68
Umidade Ótima (%)	19,5
Energia de compactação	Intermediária
k₁¹DP	0,39
k₂¹DP	0,84
k₃¹DP	0,54
k₄¹DP	0,06

¹DP: Deformação permanente.

II. Critérios de classificação técnica do projeto de vias

Os critérios de classificação técnica do projeto de vias são determinados de acordo com a norma do DNER (1999). Esses critérios são estabelecidos considerando-se a largura da plataforma de rolamento, a presença de acostamentos e o volume diário médio anual de veículos (VMA) que trafegam na rodovia. As informações detalhadas podem ser encontradas nas Tabelas IV, V e VI, onde são apresentados os parâmetros para cada classe de via.

Tabela IV – Larguras das faixas de rolamento em tangentes (em metros).

Classe do projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3,60	3,60	3,60
Classe I	3,60	3,60	3,50
Classe II	3,60	3,50	3,30*
Classe III	3,50	3,30*	3,30
Classe IV-A**	3,00	3,00	3,00
Classe IV-B**	2,50	2,50	2,50

Fonte: DNER, 1999.

Nota: **Preferivelmente 3,50m, quando esperada alta percentagem de veículo comerciais.

**Os valores referentes à Classe IV são baseados na publicação “Manual de Rodovias Vicinais” – BIRD/BNDE/DNER – 1976.

Tabela V – Larguras dos acostamentos externos (em metros).

Classe do projeto	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	3,50	3,00*	3,00*
Classe I	3,00*	2,50	2,50
Classe II	2,50	2,50	2,00
Classe III	2,50	2,00	1,50
Classe IV-A**	1,30	1,30	0,80
Classe IV-B**	1,00	1,00	0,50

Fonte: DNER, 1999.

Nota: *Preferivelmente 3,50m onde for previsto um volume horário unidirecional de caminhões superior a 250 veículos.

**Valores baseados na publicação “Manual de Rodovias Vicinais” – BIRD/BNDE/DNER – 1976. No caso de rodovias não pavimentadas, representam a contribuição para estabelecimento da largura da plataforma.

Tabela VI - Características das classes de projeto de rodovias.

Classe 0	Via expressa: rodovia do mais elevado padrão técnico, com pista dupla e controle total de acesso. O enquadramento de uma rodovia nessa classe decorrerá de decisão administrativa dos órgãos competentes, fundamentando-se, entre outros, nos seguintes critérios.	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quando os volumes de tráfego forem elevados e o tráfego do décimo ano de abertura implicar para uma rodovia de pista simples em: <ul style="list-style-type: none"> • Nível de serviço inferior ao nível C no caso de terreno plano ou levemente ondulado, o que ocorre quando o Volume Médio Diário se situa de 5.500 veículos, para o caso de região plana com excelentes condições de visibilidade ou, acima de 1.900 veículos por dia, se tratar de região levemente ondulada com más condições de visibilidade. • Nível de serviço inferior em caso de terreno fortemente ondulado ou montanhoso, o que ocorre quando o Volume Médio Diário fica de 2.600 veículos, para o caso de região fortemente ondulada com excelentes condições de visibilidade ou, acima de 1.000 veículos por dia, para o caso de região montanhosa com más condições de visibilidade. ▪ Quando a função absolutamente preponderante da rodovia for a de atender à demanda do tráfego de passagem pela região atravessa (função mobilidade), em detrimento do atendimento ao tráfego local e às propriedades lindeiras (função acessibilidade), que por hipótese serão atendidos por outras vias. ▪ Quando a interferência recíproca entre atividades humanas nas propriedades lindeiras ou áreas vizinhas à faixa de domínio (pedestres de ônibus, tráfego local, etc.) e o fluxo de tráfego direto causar atritos indesejáveis sob aspectos operacionais e de segurança; <p>Como critério complementar, que pode dispensar alguns dos anteriores, deve-se acrescentar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Quando a rodovia constituir trecho ou parte de um conjunto de rodovias para as quais se tomou a decisão de manter características uniforme e que, de um modo geral, atende às condições que justificam o enquadramento na categoria de vias expressas. 	
Classe I	A	Rodovia com duas pistas e controle parcial de acesso, com as seguintes características:

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caso de Rodovia Arterial com grande demanda de tráfego, em condições semelhantes às descritas para a Classe Especial, mas que permite maior tolerância no que diz respeito às interferências causadas por acessos mais frequentes. ▪ Os volumes de tráfego atendidos são das mesmas faixas da Classe Especial, mas sofrendo alguma redução por interferência por interferência mais frequentes de acessos.
B	<p>Rodovia em pista simples, de elevado padrão, suportando volumes de tráfego projetados para 10 anos após a abertura ao tráfego, dentro dos seguintes limites:</p> <p>➤ Limite inferior</p> <p>Volume de 1.400 veículos por dia ou Volume Horário de Projeto de 200 veículos, o que corresponde ao nível C em região montanhosa com excelentes condições de visibilidade e nível B em região plana com más condições de visibilidade.</p> <p>➤ Limite superiores</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Ficar enquadrada no nível C para regiões planas e levemente onduladas. Esta condição significa ficar abaixo de 5.500 veículos por dia, para o caso de região plana com excelentes condições de visibilidade, ou abaixo de 1.900 veículos por dia, se tratar de região levemente ondulada com más condições de visibilidade. ● Ficar enquadrada no nível D para regiões montanhosas ou fortemente onduladas. Esta condição significa ficar abaixo de 2.600 veículos por dia, para o caso de região fortemente ondulada com excelentes condições de visibilidade, ou abaixo de 1.000 veículos por dia, para o caso de região montanhosa com más condições de visibilidade. <p>Acima dessas condições é requerido o enquadramento na Classe I-A</p>
Classe II	<p>Rodovia de pista simples, suportando volumes de tráfego, conforme projetados para o 10º ano após a abertura ao tráfego, compreendidos entre os seguintes limites:</p> <p>➤ Limite inferior</p> <p>Volume Médio Diário de 700 veículos. Dependendo das condições da orografia da região e das oportunidades de ultrapassagem o nível de serviço variará de A para o limite entre C e D.</p> <p>➤ Limite superior</p> <p>Volume Médio Diário de 1.400 veículos. Dependendo das condições locais o nível de serviço variará entre A e D.</p>
Classe III	<p>Rodovia de pista simples, suportando volumes de tráfego, conforme projetados para o 10º ano após abertura ao tráfego compreendidos entre os seguintes limites:</p> <p>➤ Limite inferior</p> <p>Volume Médio Diário de 300 veículos. Dependendo das condições locais o nível de serviço ficará enquadrado entre A e D.</p> <p>➤ Limite superior</p>

	Volume Médio Diário de 700 veículos. Dependendo das condições locais o nível de serviço ficará enquadrado entre A e D.	
Classe	Rodovia de pista simples, com características técnicas suficientes para atendimento a custo mínimo do tráfego previsto no seu ano de abertura. Geralmente não é pavimentada e faz parte do sistema local, compreendendo as estradas vicinais e eventualmente rodovias pioneiras. Dependendo do comportamento dos volumes de tráfego a rodovia poderá ser enquadrada em uma das classes convencionais. Em função do tráfego previsto são definidas duas subclasses:	
	Classe IV-A	Tráfego Médio Diário de 50 a 200 veículos no ano de abertura
	Classe IV-B	Tráfego Médio Diário inferior a 50 veículos no ano de abertura
	Os níveis de serviço correspondentes podem variar muito, já que as condições de manutenção da superfície de rolamento serão os fatores predominantes para conforto e velocidade, em face aos baixos volumes de tráfego.	

Fonte: DNER, 1999.

III. Denominação das siglas do *software* SimaPro e da biblioteca Ecoinvent

A compreensão das seleções de funções ao utilizar o *software* SimaPro em conjunto com a biblioteca Ecoinvent tem um impacto significativo nos resultados. Nesse sentido, serão apresentadas as siglas das principais funções que influenciam a metodologia utilizada.

Dentro do contexto do *software* SimaPro, as abordagens "APOS" (*Allocation at the Point of Substitution*) e "Consequential" representam diferentes perspectivas utilizadas para avaliar o ciclo de vida de produtos, processos ou sistemas. De acordo com SimaPro (2022), a definição é:

APOS: No modelo padrão de alocação de sistema, duas escolhas metodológicas são aplicadas. A primeira opção utiliza a média do fornecimento de produtos, conforme definido nos conjuntos de dados de atividade de mercado. A segunda opção envolve a partição, que converte conjuntos de dados multiprodutos em conjuntos de dados individuais de produtos. Nesse contexto, os fluxos são alocados com base no seu valor real, que é a receita econômica ajustada por algumas imperfeições e flutuações de mercado.

Consequential: O modelo de sistema "*consequential*" aborda duas escolhas metodológicas distintas. A primeira opção emprega o fornecimento irrestrito de produtos, baseando-se em conjuntos de dados de atividade de mercado, além de informações incluídas no nível tecnológico. A segunda opção envolve a substituição,

expandindo o sistema e convertendo conjuntos de dados multiprodutos em conjuntos de dados individuais de produtos. O modelo resultante é projetado para refletir as consequências de decisões de pequena escala e de longo prazo, considerando as restrições relevantes nesse escopo e horizonte temporal. Esse modelo leva em conta as mudanças a longo prazo, e a determinação do nível tecnológico de fornecedores sem restrições que dependem das tendências de mercado.

Segundo o SimaPro (2023b), o processo de ACV pode ser categorizado em *unit* ou *system*. Os processos unitários englobam conexões com outros processos unitários, a partir dos quais os fluxos de inventário podem ser calculados pelo próprio SimaPro. Por outro lado, os processos de sistema já incorporam os fluxos de inventário calculados, e não possuem interconexões com outros processos. Caso se opte por utilizar processos da base de dados Ecoinvent como processos de fundo, é recomendável escolher os processos de sistema para otimizar a velocidade de cálculo. Os processos unitários podem ser empregados para análises detalhadas e avaliação de incerteza através do método Monte Carlo (com exceção da biblioteca *Consequential*).

Contudo, devido à estrutura em *loop* presente nos processos unitários, o tempo de cálculo pode ser prolongado, dependendo da velocidade do seu computador. Tanto os processos unitários quanto os de sistema fornecem o mesmo resultado, embora ocasionalmente possa haver pequenas discrepâncias devido a erros de arredondamento.

De acordo com Ecoinvent 3.0 (2023), as abreviações indicadas entre chaves {XXX} correspondem à representação geográfica associada aos dados do material em análise. Por exemplo, GLO representa dados globais, ROW se refere a outras partes do mundo, CH designa a Suíça, RER representa a Europa, CZ se refere à República Tcheca, CN é relacionado à China, US corresponde aos Estados Unidos e BR representa o Brasil. Essas siglas têm o propósito de identificar a origem geográfica dos dados específicos relacionados ao material em consideração.

No momento de selecionarmos os serviços e produtos, deveremos nos atentar para o fato do transporte estar ou não embutido nos processos considerados, e a forma pela qual tais considerações foram adotadas. Geralmente, quando se escolhe “Market” ao contrário de “transformation”, o transporte já foi considerado de alguma maneira,

cabendo ao usuário verificar qual deles. Portanto, de acordo com o SimaPro (2023c), o Ecoinvent 3.0 classifica:

Market processes: inclui insumos, bem como insumos de processos de transporte – geralmente utilizados quando não é definido um fornecedor específico para o estudo;

Transformation processes: contém todos os insumos para a fabricação de um produto ou serviço, exceto para transporte.