

## Relatório Técnico Nº 01/2025

# **Análises Orçamentárias e de Emissões de Carbono na Implantação de Pavimentos Asfálticos e de Concreto de Cimento Portland**

<b>CONTRATANTE:</b>		
ABEDA / GRECA		
<b>Equipe de Trabalho:</b>	<b>Deividi da Silva Pereira</b>	Professor/UFSM
	<b>Silvio Lisboa Schuster</b>	Professor/UFSM
	<b>Cléber Faccin</b>	Dr. Engenharia Civil
	<b>Luciano Pivoto Specht</b>	Professor/UFSM
	<b>Gustavo Lau</b>	Eng. Civil / PGE
<b>Data final do Relatório:</b> 15/08/2025		<b>Revisado em:</b> 08/09/2025
<b>Contatos:</b> Fone: (55) 3254-1526 / Email: pgeconstrucoes@hotmail.com		

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	5
OBJETIVOS .....	7
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
1.1 Dimensionamento de Pavimentos asfálticos .....	9
1.1.1 Pavimentos asfálticos – Métodos de Dimensionamento .....	9
1.1.1.1 MeDiNa .....	10
1.2 Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Simples com Juntas Serradas .....	17
1.2.1 Pavimentos de Concreto de Cimento Portland (CCP) – Teorias de Cálculo dos Esforços para o Dimensionamento dos Pavimentos .....	19
1.2.1.1 Método de Dimensionamento de Pavimentos de CCP em uso no Brasil – PCA (1984) .....	20
1.3 Projetos Licitados recentemente .....	25
1.3.1 Projetos de Pavimentos Asfálticos .....	25
1.3.2 Projetos de Pavimentos de Concreto de Cimento Portland .....	27
1.4 Orçamento de obras rodoviárias .....	28
1.4.1 Sistemas de custos rodoviários .....	28
1.4.2 Estudos anteriores que realizaram comparações de custos de construção .....	31
1.5 Emissões de CO <sub>2</sub> .....	34
1.5.1 Emissões de GEE em misturas asfálticas .....	37
1.5.1.1. Produção de Matérias-Primas (A1) .....	38
1.5.1.2. Transporte até a Usina de Mistura Asfáltica (A2) .....	39
1.5.1.3. Etapa de Produção da Mistura Asfáltica (A3) .....	40
1.5.1.4. Construção de Pavimentos (A4-A5) .....	40
1.5.1.5. Emissões de CO <sub>2</sub> em cada etapa da cadeia produtiva do pavimento asfáltico .....	41
1.5.2 Emissões de GEE em pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland .....	41
1.5.2.1 Emissões de CO <sub>2</sub> em cada etapa da cadeia produtiva do pavimento de CCP ..	42
1.5.3 Pavimento de Concreto de cimento Portland vs pavimento asfáltico .....	43
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	45
2.1 Definições de Tráfego .....	46
2.2 Definições das Condições Geotécnicas e de Materiais Empregados .....	47
2.3 Dimensionamento das estruturas .....	50
2.3.1 Pavimentos asfálticos .....	50
2.3.1.1 Dimensionamento de estruturas de Pavimentos asfálticos – Método do DNER ..	51

2.3.1.2	Dimensionamento de estruturas de Pavimentos asfálticos – MeDiNa.....	52
2.3.2	Pavimentos de concreto.....	53
2.3.3	Dimensionamento Estrutura dos Acostamentos e sua compatibilização com a estrutura das faixas de rolagem .....	58
2.4	Análise orçamentária.....	60
2.4.1	Composições de custo – critérios adotados.....	60
2.4.2	Cálculo de transporte e aquisição dos materiais asfálticos.....	80
2.4.3	Bonificação e Despesas Indiretas (BDI).....	81
2.4.4	Distâncias médias de transporte (DMTs) adotadas.....	82
2.4.5	Limitações do estudo relacionadas à análise orçamentária.....	83
2.5	Análise das emissões de CO <sub>2</sub> .....	83
2.5.1	Unidade funcional.....	84
2.5.2	Limites do sistema .....	84
2.5.3	Utilização do SICRO para contabilização das emissões .....	85
2.5.4	Etapa de produção dos materiais .....	86
2.5.5	Etapa de operações de transporte .....	87
2.5.6	Execução dos pavimentos.....	88
2.5.7	Total do serviço.....	88
2.5.8	Fatores de emissão dos materiais empregados na pavimentação.....	88
3	RESULTADOS E ANÁLISES .....	91
3.1	Análises orçamentárias.....	91
3.1.1	Análise orçamentária – pavimentos asfálticos .....	92
3.1.2	Análise orçamentária – pavimentos de concreto de cimento Portland.....	94
3.1.3	Análise orçamentária – comparações entre pavimentos asfálticos e em concreto de cimento Portland .....	95
3.1.4	Análise orçamentária – avaliações complementares .....	97
3.1.4.1	Estruturas dimensionadas com o FlexPAVE™ e estruturas semirrígidas .....	98
3.1.4.2	Proporção dos custos dos insumos relevantes .....	107
3.1.4.3	Análise de sensibilidade sobre os custos – consumos de ligantes asfálticos e de cimento Portland.....	110
3.2	Análise das emissões de CO <sub>2</sub> eq .....	113
3.2.1	Emissões de CO <sub>2</sub> eq – pavimentos asfálticos .....	113
3.2.2	Emissões de CO <sub>2</sub> eq – pavimentos de concreto de cimento Portland.....	116
3.2.3	Análise Comparativa de Emissões de CO <sub>2</sub> eq entre as soluções em pavimentos asfálticos e em concreto de cimento Portland .....	117
3.2.4	Análise de emissões de CO <sub>2</sub> eq – avaliações complementares.....	118
3.2.4.1	Estruturas dimensionadas com o FlexPAVE™ e estruturas semirrígidas ....	119

3.2.4.2	Emissões por nível de tráfego para todas os cenários.....	120
3.2.4.3	Proporção de emissão de CO <sub>2</sub> eq para cada grupo do processo construtivo..	124
3.2.4.4	Emissões por tonelada produzida de CCP e Mistura Asfáltica .....	126
3.2.4.5	Impacto dos distintos materiais e serviços sobre as emissões de CO <sub>2</sub> durante a construção do pavimento .....	127
3.2.4.6	Análise de sensibilidade sobre as emissões – consumo de ligantes asfálticos e de cimento Portland.....	132
4	CONCLUSÕES.....	138
4.1	Análises Orçamentárias.....	138
4.2	Análises de Emissões de CO <sub>2</sub> eq .....	139
4.3	Considerações Finais .....	141
5	REFERÊNCIAS .....	142

## INTRODUÇÃO

Este trabalho versa sobre os custos de implantação de alternativas de pavimentação em Concreto de Cimento Portland (CCP) e em Concreto Asfáltico (CA), bem como as emissões geradas na construção destas alternativas de pavimentos. O presente relatório, que consolidou o estudo técnico-científico, fora contratado pela *Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras e Industrializadoras de Asfaltos (ABEDA)* e pela *GRECA Distribuidora de Asfaltos Ltda.*, junto à *PGE Construções Ltda.* A contratada, por sua vez, contou com a supervisão técnica e científica dos professores e pesquisadores da *Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)* e do *Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV)*, a saber: *Deividi da Silva Pereira* (professor), *Silvio Lisbôa Schuster* (professor), *Cléber Faccin* (Doutor em Engenharia Civil pela UFSM) e *Luciano Pivoto Specht* (professor).

O Brasil possui apenas 12,4% de sua malha viária pavimentada, do total de 1.720.909 km, segundo dados publicados na última pesquisa (2024) CNT de Rodovias da Confederação Nacional do Transporte (CNT).

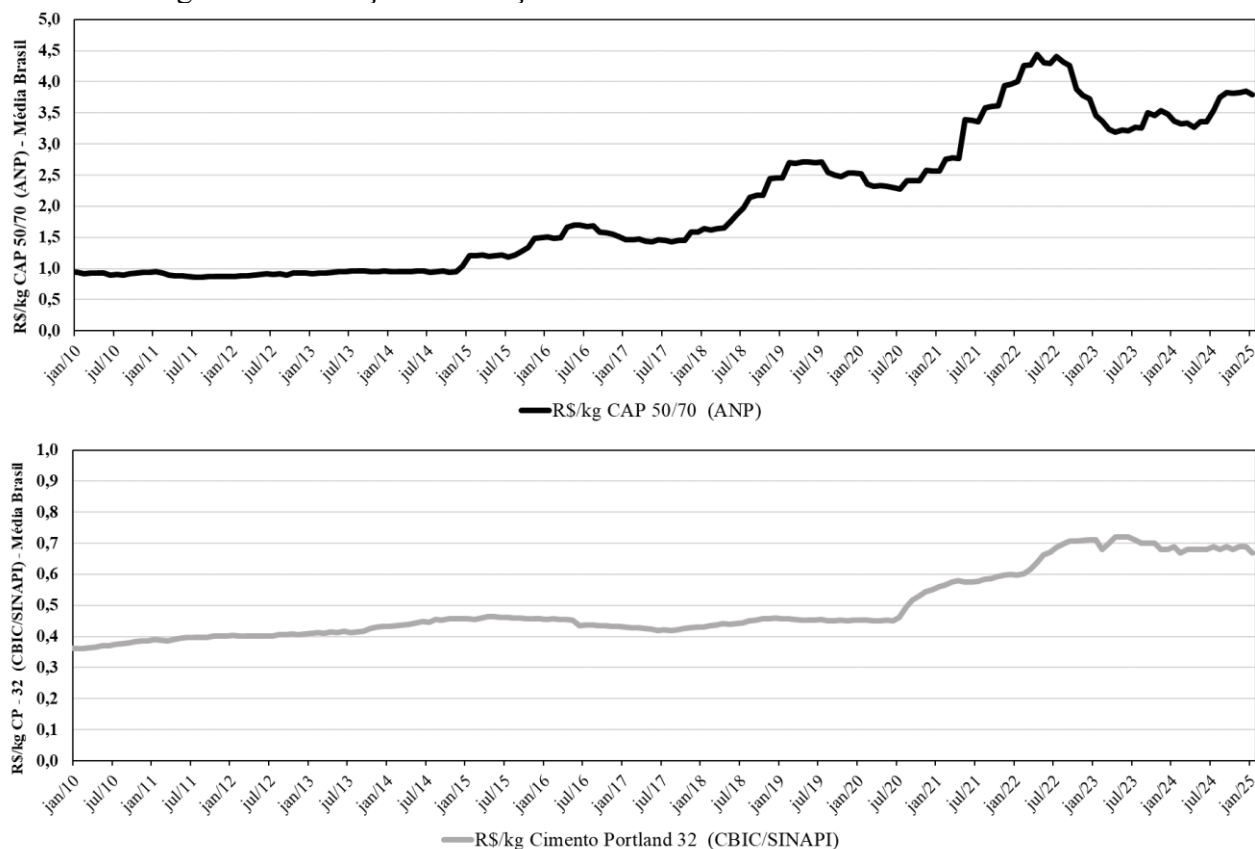
Sabidamente, o modo rodoviário possui prevalência sobre os demais modos de transporte, tanto para a movimentação de cargas quanto de pessoas no Brasil. Contudo, o país apresenta baixa densidade de malha rodoviária pavimentada, com apenas 25,1 km/mil km<sup>2</sup>, muito atrás da China e dos Estados Unidos, com média de 440 km/mil km<sup>2</sup>, abaixo do Equador (31,4 km/mil km<sup>2</sup>) e pouco acima do Paraguai (21,1 km/mil km<sup>2</sup>).

Depreende-se dessas informações a existência de um grande *déficit* de vias a serem pavimentadas e, também, segundo a mesma pesquisa supracitada, de necessidade de manutenção e/ou restauração de boa parte da malha viária pavimentada, uma vez que 56,9% das vias estão com o conceito do pavimento entre regular a péssimo.

O cenário atual, somado aos elevados investimentos necessários à implantação e/ou restauração da malha viária e às severas restrições orçamentárias que norteiam o dia a dia dos agentes públicos e privados, fazem legítima a busca por opções de pavimentação mais econômicas, sem, no entanto, que o desempenho e a eficiência das soluções em pavimentação sejam esquecidos.

Nos últimos anos, os conflitos geopolíticos internacionais, a política de preços do petróleo assumida pelas últimas gestões federais e a valorização do dólar frente ao real trouxeram a elevação significativa do custo do Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) no Brasil. Ao mesmo tempo, a elevação do custo do Concreto Portland (CP) não foi tão acentuada quanto a do CAP (vide Figura 1). Entre 2010 e o início de 2025, o CAP 50/70 aumentou 305%, enquanto o CP-32 subiu 85%.

Figura 1 – Evolução dos Preços Médios no Brasil do CAP 50/70 e do CP-32



Fonte: Autores, com dados da ANP, CBIC e SINAPI

Tais condições comerciais, segundo estudos apresentados pela indústria do cimento, teriam aumentado a “atratividade” dos pavimentos de CCP em relação aos seus custos de implantação, na comparação com os pavimentos asfálticos. Ainda, a mesma indústria do CP, na intenção de demonstrar os benefícios ambientais do emprego de pavimentos de CCP, tem citado a menor demanda por energia elétrica para a iluminação pública, menores temperaturas nos pontos de sua aplicação por conta de menor absorção de calor e, sobretudo, enfatizando que a solução em CCP é mais sustentável.

Diante do contexto ora colocado, justifica-se a necessidade do desenvolvimento de um estudo técnico-científico, crítico, abrangente e isonômico, a fim de auxiliar a tomada de decisão de entes públicos e privados em relação às alternativas de pavimentação, considerando aspectos econômicos e de sustentabilidade ambiental do emprego de soluções de pavimentação em placas de CCP com juntas serradas e com barras de transferência e ligação e em CA.

***Em tempo, cabe ressaltar que os resultados e análises apresentados neste estudo não podem ser reproduzidos de maneira separada ou desmembrada do corpo integral deste relatório. Ainda, as análises e conclusões inseridas neste documento fazem menção às condições específicas assumidas como premissas de materiais, custos, emissões e técnicas consoantes ao momento do***

*desenvolvimento desta pesquisa, setembro de 2025, guardando, portanto, relação ao potencial desempenho das estruturas investigadas segundo o desenvolvimento técnico dos métodos de dimensionamento disponíveis no presente momento.*

## OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo técnico-científico é estabelecer, em igualdade de condições de tráfego, os custos de implantação e as emissões de CO<sub>2</sub> das distintas alternativas em pavimentação. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram traçados para os dois grupos de análises a serem conduzidas.

- Custos de Implantação de Pavimentos de CCP e CA:
  - Apresentar os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos indicados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para as alternativas de pavimentação asfálticas e de Concreto de Cimento Portland (CCP);
  - Estabelecer cinco condições de tráfego distintas, variando entre leve e extremamente pesada;
  - Dimensionar, a partir de premissas técnicas idênticas, as estruturas de pavimentos asfálticos e de CCP;
  - Empregar dados de misturas asfálticas com distintos tipos de ligantes;
  - Orçar os custos diretos de implantação da pavimentação destas alternativas;
  - Realizar análises orçamentárias comparativas das diferentes alternativas consideradas para a implantação de 1 km de via;
  - Avaliar criteriosamente as composições de custos da execução de pavimentos asfálticos e de CCP, realizando uma análise de sensibilidade dos insumos mais impactantes na matriz orçamentária.
- Emissões de CO<sub>2</sub>:
  - Revisar a bibliografia técnica existente acerca dos índices de emissões de CO<sub>2</sub> na produção de Cimento Portland (CP) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP);
  - Quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> na construção das duas alternativas de pavimentação, para as soluções estudadas na parte de custos de implantação deste estudo;
  - Analisar, comparativamente, as emissões de CO<sub>2</sub> entre esses dois ligantes aplicados na pavimentação.

Neste momento, cabe ressaltar que o emprego da expressão “emissões de CO<sub>2</sub>” refere-se, em linhas gerais, às emissões equivalentes de gases que interferem no efeito estufa, frequentemente

abreviados por **GEE**, gerados nas distintas etapas produtivas envolvidas; no caso deste estudo, na pavimentação.

Ainda, este estudo não teve como objetivo avaliar o ciclo de vida do pavimento e, nesta primeira etapa, restringirá suas avaliações até a construção das distintas soluções em pavimentação.



## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Dimensionamento de Pavimentos asfálticos

#### 1.1.1 Pavimentos asfálticos – Métodos de Dimensionamento

Em âmbito nacional, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece como método oficial de dimensionamento de pavimentos asfálticos aquele contido no Manual de Pavimentação (IPR-719, de 2006), conhecido como o *Método do DNER*. Esse método tem sua fundamentação no *Método do Corpo de Engenheiros do Exército Americano* (USACE), considerando alguns resultados das pistas experimentais da *AASHO Road Test*.

O procedimento normativo dimensiona o pavimento asfáltico com vistas a sua proteção contra a ruptura por cisalhamento dos materiais granulares e do solo constituintes da estrutura viária. O método estabelece a espessura mínima de revestimento asfáltico em função do tráfego, tomado a partir do número de solicitações equivalentes do eixo-padrão (Eixo Simples de Rodas Duplas - ESRD, com 8,2 tf e pressão de inflação dos pneus de 0,56 MPa ou 80 PSI) e dos fatores de equivalência de carga do USACE.

Determina, ainda, as espessuras das camadas de reforço do subleito e das camadas de sub-base e base, em função dos coeficientes de equivalência estrutural passíveis de emprego em cada uma das camadas do pavimento e das espessuras mínimas, referenciadas ao material granular padrão (brita graduada simples – BGS), obtidos a partir do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) das camadas de subleito e/ou reforço do subleito e da sub-base.

Esse método prestou importantes serviços ao rodoviarismo nacional no passado. Contudo, atualmente, sua aplicação não seria condizente com o perfil de cargas e eixos, bem como não protegeria a estrutura viária dos mais recorrentes mecanismos de ruptura que têm impactado o desempenho dos pavimentos asfálticos, isto é: afundamentos em trilha de rodas e fadiga das misturas asfálticas e/ou camadas cimentadas.

Ainda, o método do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), quando fora desenvolvido, não previa o emprego de misturas asfálticas com ligantes asfálticos modificados por polímeros ou borracha, por exemplo. Atualmente, essas misturas asfálticas modificadas apresentam desempenhos à fadiga e a deformações em trilhas de roda muito superiores aos seus antecessores (sem modificações).

Diante das limitações atuais do antigo método, tanto o Tribunal de Contas da União (TCU) quanto o DNIT estabeleceram a necessidade de emprego de metodologias mais atuais para o dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. Desse modo, o DNIT emitiu a *Instrução de Serviço 247 de 2021 - Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de*

*Dimensionamento Nacional – MeDiNa* e, em 04 de fevereiro de 2022, estabeleceu a *Instrução Normativa N°2/DNIT SEDE*, determinando o emprego de métodos de dimensionamento mecanicistas, mesmo em obras que não contemplavam, no termo de referência, o dimensionamento desta forma. Tal instrução fora resposta ao *Acórdão 1994/2013 do TCU-Plenária*.

Cabe lembrar que, desde 2014, o DNIT, junto com o Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR), tem incentivado o emprego do MeDiNa, desenvolvido por inúmeras pesquisas no Brasil (fortemente suportadas pelo apoio da ANP/PETROBRAS através da Rede de Tecnologia em Asfalto) e consolidado pelo Termo de Execução Descentralizado TED 682/2014 celebrado entre o IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro (COPPE). Atualmente, o **MÉtodo de DI**imensionamento **NA**cional (**MeDiNa**), que também é alusivo ao Prof. Jacques de Medina, emérito professor da COPPE e que trouxe a mecânica de pavimentos para o Brasil, está disponível para *download* gratuito no sítio eletrônico do DNIT.

#### **1.1.1.1 MeDiNa**

A proposta entregue ao IPR/DNIT, elaborada em sua representação final por Franco e Motta (2018), buscou substituir/complementar o atual método vigente de dimensionamento de pavimentos asfálticos por uma rotina que contempla a caracterização dos materiais e o cálculo de esforços mediante simulações computacionais, compilada na plataforma MeDiNa, calibrada também com observações de campo em pistas experimentais. Salienta-se que o método está em constante atualização e que tais avanços estão sendo possibilitados pelos diversos TEDs contratados pelo DNIT/IPR atualmente.

Esforços em conjunto, exemplificados pelos trabalhos de Franco (2007), Nascimento (2008), Guimarães (2009), Nascimento (2015) e Fritzen (2016), já trouxeram evoluções significativas para a modelagem dos principais mecanismos de ruptura estrutural observados nos pavimentos asfálticos brasileiros: deformação permanente e trincamento por fadiga, proporcionando uma evolução em relação ao seu antecessor, que buscava apenas conceber um sistema de camadas no intuito de proteger o subleito contra a ruptura por cisalhamento. Um pavimento, investigado sob a ótica mecanicista, pode ter sua resposta estrutural estimada pelo cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura pela passagem de um eixo rodoviário associado a um modelo de previsão de desempenho.

Na fase de concepção dos métodos de dimensionamento empírico-mecanicista, deve-se atrelar uma etapa de campo, com observações empíricas em pistas experimentais que buscam identificar o sucesso ou insucesso de utilização in loco de materiais de pavimentação ou técnicas construtivas;

uma etapa laboratorial, com realização de ensaios experimentais em amostras submetidas às condições próximas daquelas encontradas em campo, no intuito de caracterizar os materiais de pavimentação e identificar seu desempenho nos domínios de comportamento em termos de rigidez e danificação; e, por fim, uma etapa mecanista, com a utilização de uma ferramenta computacional para estimar os esforços gerados pela passagem dos eixos dos veículos rodoviários comerciais na estrutura avaliada.

Em linhas gerais, o projeto de pavimentos novos por uma rotina empírico-mecanicista deve seguir o fluxograma de atividades exposto por Motta (1991). Medina e Motta (2015) descrevem que, para a realização do dimensionamento de pavimentos revestidos por concreto asfáltico, o usuário deve fornecer ao sistema computacional de projeto os dados de entrada (fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas). Posteriormente, o processamento mecanicista busca evitar com que os processos de ruptura do pavimento o acometam precocemente, isto é, antes do atingimento do número de solicitações equivalentes do eixo-padrão (N) de projeto.

Portanto, para que o dimensionamento logre êxito, deve-se considerar adequadamente o tráfego atuante sobre a estrutura ao longo da sua vida de projeto, os materiais considerados em sua concepção (avaliando suas propriedades de rigidez e danificação) e a rotina de cálculo de esforços empregada na etapa mecanista.

### ***Parâmetros de Caracterização dos Materiais necessários ao emprego do MeDiNa***

O conhecimento dos parâmetros de caracterização dos materiais utilizados na composição de uma estrutura rodoviária pode ser considerado como uma premissa fundamental para o sucesso do projeto desenvolvido pelo MeDiNa. Basicamente, como expresso anteriormente, os materiais precisam ter suas propriedades de rigidez e danificação bem definidos.

O MeDiNa considera, como dados de entrada obrigatórios para projetar a estrutura, os módulos de resiliência e a equação de previsão da deformação permanente dos materiais granulares e de solo; e, para as misturas asfálticas e materiais cimentados, os módulos de resiliência e as equações de fadiga desses materiais. Por óbvio, todos os materiais, do subleito ao revestimento asfálticos, devem ter atendidos os parâmetros impostos nas especificações de serviço e no consequente controle executivo.

Nesta breve abordagem, não é a intenção dos autores deste estudo trazer todos os ensaios, nem, tão pouco, descrever seus procedimentos normativos. Assim, na Tabela 1 estão descritos os ensaios principais que deverão alimentar o MeDiNa, a fim de propiciar o pleno dimensionamento de uma via a ser implantada.

Tabela 1 – Ensaaios Essenciais ao MeDiNa

Material	Parâmetro a ser caracterizado	Ensaio	Norma
Concreto Asfáltico	Rigidez	Módulo de Resiliência	DNIT-ME 135/2010 e ABNT 16018/2011
	Fadiga	Ensaio De Fadiga Por Compressão Diametral À Tensão Controlada	DNIT 183/2018-ME
	Deformação Permanente	Ensaio Uniaxial De Carga Repetida Para Determinação Da Resistência À Deformação Permanente – <i>Flow Number</i>	DNIT 184/2018 – ME e ABNT NBR 16505/16
Materiais Cimentados	Rigidez	Módulo de Resiliência à Compressão Diametral Ou Material Estabilizado Quimicamente - Determinação Do Módulo De Resiliência	DNIT-ME 135/2010 ABNT 16018/2011 DNIT 181/2018
	Fadiga	Ensaio De Fadiga Por Compressão Diametral À Tensão Controlada Em Camadas Estabilizadas Quimicamente	DNIT 434/2021
Materiais Granulares	Rigidez	Ensaio Triaxial de Módulo de Resiliência de Solos e Materiais Granulares	DNIT-ME 134/2018
	Deformação Permanente	Ensaio Triaxial de Deformação Permanente de Solos e Materiais Granulares	DNIT IS 179/2018 Guimarães (2009)
Solos (subleito e/ou demais camadas)	Rigidez	Ensaio Triaxial de Módulo de Resiliência de Solos e Materiais Granulares	DNIT 134/2018-ME
	Deformação Permanente	Ensaio Triaxial de Deformação Permanente de Solos e Materiais Granulares	DNIT 179/2018 - IE Guimarães (2009)

Fonte: Autores

Dos dados informados na Tabela 1, depreende-se que o MeDiNa apresenta importantes avanços em relação aos parâmetros adotados no dimensionamento quando comparado à caracterização dos materiais no dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo *Método do DNER*, que empregava, basicamente, o ISC/CBR de solos e materiais granulares e os coeficientes de equivalência estrutural dos materiais. No método mais antigo, por exemplo, uma mistura asfáltica de melhor qualidade, empregando asfaltos modificados por polímero, teria o mesmo impacto no dimensionamento estrutural do pavimento de uma mistura asfáltica mal dosada e com baixo desempenho à fadiga.

### ***Rotina de Cálculo de Tensões, Deformações e Deslocamentos do MeDiNa***

Na rotina de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos efetuada pelo MeDiNa, o pavimento é considerado como uma estrutura elástico-linear. Com isso, o algoritmo de cálculo emprega os conceitos gerais da teoria da elasticidade aplicada aos sistemas estratificados, cuja formulação fundamentou-se na teoria de Boussinesq, desenvolvida em 1885, para meios semi-infinitos, homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos. Em 1943, Burmister aprimorou a teoria

de Boussinesq, desenvolvendo a solução através do modelo *Layered-Elastic Theory* (LET). Fernandes (2000), Khazanovich e Wang (2007) destacam as seguintes hipóteses assumidas na análise elástico-linear de um semiespaço elástico:

- a) Todas as camadas são elástico-lineares;
- b) As camadas são infinitas na direção horizontal e têm espessura constante;
- c) O material é homogêneo, o que significa apresentar propriedades iguais em qualquer ponto do semiespaço (sem descontinuidades);
- d) O material é isotrópico, o que equivale dizer que suas propriedades elásticas são as mesmas em qualquer direção;
- e) Não existem tensões ou deformações iniciais na estrutura;
- f) A carga aplicada é distribuída por uma área circular;
- g) Os materiais ficam caracterizados por duas propriedades: o coeficiente de Poisson e o módulo de resiliência, sendo que o material obedece à lei de Hooke generalizada para materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos.

Para Ullidtz (1987), a teoria da elasticidade representa uma aproximação do comportamento real da estrutura do pavimento. Experiências em laboratório e em campo, tais como o modelo simplificado de Albernaz (1997), mostraram um comportamento “quase” elástico dos pavimentos quando submetidos às cargas usuais de tráfego, permitindo, com alguma aproximação, o uso dos modelos elásticos, onde o conjunto pavimento/subleito é representado por um sistema de camadas elásticas estratificadas (pavimento) sobre um maciço elástico (subleito) (SIMM JÚNIOR, 2007; SCHMALZER, 2014).

Dentro do sistema do MeDiNa, o programa Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), desenvolvido em grande parte por Franco (2007), é o programa empregado para o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, com rotinas para entrada de dados e apresentação dos resultados. Esta sub-rotina do MeDiNa também pode ser utilizada de maneira independente para o cômputo dos esforços. Dessa forma, conhecendo-se as características do tráfego e os parâmetros de caracterização dos materiais utilizados na composição de uma estrutura rodoviária, como já expresso, isto é, a rigidez, será possível estimar os principais esforços que acometerão o pavimento.

### ***Crítérios de Ruptura avaliados pelo MeDiNa***

Enquanto o *Método do DNER* assumia apenas o cisalhamento das camadas granulares e/ou solo como mecanismo de ruptura, o MeDiNa assume a fadiga do revestimento asfáltico (%AT) e/ou materiais cimentados e o afundamento em trilha de rodas (ATR), como critérios de ruptura. Cabe

lembrar que esses dois processos considerados no MeDiNa são, atualmente, os modos de ruptura mais comuns nas rodovias pavimentadas do Brasil.

Em relação ao acúmulo de deformações permanentes que geram os afundamentos em trilha de rodas, ressalta-se que o método desconsidera a contribuição das camadas cimentadas e da mistura asfáltica. Especificamente em relação às misturas asfálticas, o MeDiNa assume que uma mistura asfáltica somente poderá ser empregada no caso em que o seu *Flow Number* (FN) estiver dentro dos parâmetros elencados na Tabela 2, função do tráfego previsto para o projeto.

Tabela 2 – Critérios de *Flow Number* (FN) indicados no MeDiNa (versão 1.1.9.0)

Flow Number (FN)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
$FN \geq 100$ ciclos	$N < 10^6$	Não recomendado
$100 \leq FN < 300$ ciclos	$10^6 \leq N < 10^7$	$N < 10^6$
$300 \leq FN < 750$ ciclos	$10^7 \leq N < 10^8$	$10^6 \leq N < 10^7$
$750 \leq FN < 2000$ ciclos	$N \geq 10^8$	$10^7 \leq N < 10^8$
$FN \geq 100$ ciclos	---	$N \geq 10^8$

Fonte: DNIT (2023)

Segundo a versão mais atual do MeDiNa (versão 1.1.9.0, de abril de 2023), as condições de tráfego e da via “Normais” são aquelas quando se têm velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Por outro lado, as condições “Severas” implicam em tráfego lento (velocidade menor do que 60 km/h), intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada. Considera-se a temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico quando a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, a 20 mm de profundidade, determinada conforme norma AASHTO M 323 – *Superpave Volumetric Mix Design*, for igual ou inferior a 64 °C. Quando a mesma temperatura máxima média for superior a 64 °C, então considera-se elevada.

Em termos de critério final de ruptura para a fadiga, 30% de área fissurada do revestimento asfáltico é o limite máximo, devendo a área fissurada ser computada pelo ensaio preconizado em DNIT 433/2021. Quanto à deformação permanente (ATR), os limites assumidos são função da classe hierárquica da via, que também determina o nível de confiabilidade a ser adotado no dimensionamento do pavimento asfáltico, conforme descrito na Tabela 3, em função do tráfego previsto para o projeto.

Tabela 3 – Limites para ATR, %AT e Confiabilidade assumidos pelo MeDiNa (versão 1.1.9.0)

Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada (%AT)	Deformação Permanente (ATR)
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: DNIT (2023)

### ***Função de Transferência assumida pelo MeDiNa***

Talvez o grande diferencial deste método de dimensionamento seja a possibilidade de transformar esforços induzidos pelo tráfego e calculados na estrutura do pavimento, a partir do MeDiNa, em uma grandeza física, prática e evidenciada pelos técnicos em campo, isto é, área trincada do revestimento asfáltico.

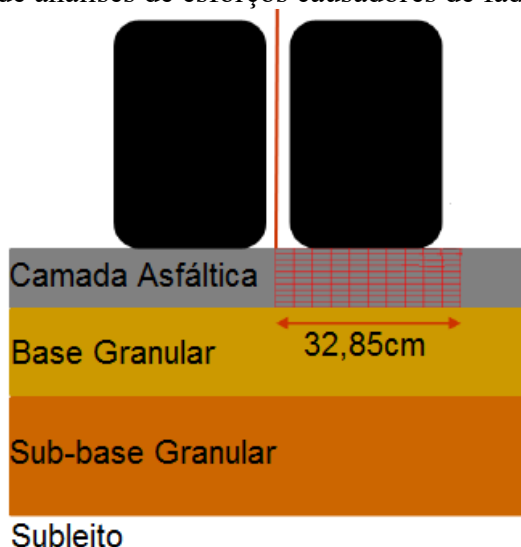
Para tanto, houve um grande esforço, inicialmente liderado pela ANP/PETROBRAS e inúmeras universidades brasileiras, em que, a partir de segmentos experimentais monitorados sistematicamente, conseguiu-se correlacionar o efeito dos esforços gerados pelos eixos rodoviários, em termos de esforços de tração na flexão induzidos pelo tráfego no revestimento asfáltico, e a área fissurada por fadiga no revestimento desses trechos experimentais.

Dessa maneira, Fritzen (2016) propôs a primeira calibração dos danos por fadiga em termos de área trincada em seu trabalho, que foi, posteriormente, validada e atualizada para a versão atual do MeDiNa. A descrição precisa do processo de calibração pode ser pesquisada em inúmeros trabalhos disponíveis, sobretudo na tese de Fritzen (2016) e no próprio manual do MeDiNa (DNIT, 2023).

Como novidade à forma corrente até então para o cômputo dos esforços que causam fadiga no concreto asfáltico, o trabalho de Fritzen (2016) determinou o dano médio à fadiga a partir de um agrupamento de 110 pontos distribuídos lateralmente às áreas de contato dos pneus do semieixo do eixo-padrão sobre o pavimento e na profundidade do revestimento asfáltico, conforme representado na Figura 2, à semelhança do que fora empregado por Nascimento (2015). Atualmente, para tornar o processo de cálculo mais simples, o MeDiNa adota 20 pontos, alinhados na fibra superior e na fibra inferior do revestimento asfáltico.



Figura 2 – Pontos de análises de esforços causadores de fadiga no revestimento



Fonte: Nascimento (2015)

### ***Análise Crítica do MeDiNa***

Nenhum método de dimensionamento que se propõe a ser atual pode ser tratado como inerte ao tempo. Os métodos de dimensionamento devem avançar conforme o estado-da-prática em uma determinada área evolui. O método de dimensionamento conhecido como o *Método do DNER*, em que pese estar desatualizado, já prestou importantes serviços ao rodoviarismo nacional; porém ficou parada no tempo. Certamente, o MeDiNa não está isento a críticas. Ele representa, indubitavelmente, um importante passo para o emprego de processos de dimensionamento mecanicistas, indo ao encontro do que ocorre em muitos países do mundo.

Durante o desenvolvimento do MeDiNa, algumas divergências respeitadas entre os técnicos e pesquisadores estavam presentes nas definições. O emprego de uma base de cálculo de esforços pautada na teoria elástica de camadas ou em elementos finitos é um exemplo. A formatação do ensaio de danificação por fadiga de misturas asfálticas a ser introduzida no método também foi amplamente discutida. O emprego ou não dos fatores de equivalência de carga do USACE foi debatido. Outro ponto que permeou as discussões durante a fase de desenvolvimento do MeDiNa concentrava-se na condição de aderência entre as camadas, sobretudo entre o revestimento asfáltico e uma base granular. Inclusive, o método de avaliação das fissuras por fadiga constantes nos segmentos experimentais que serviram de calibração e validação da função de transferência foi alvo de divergência.

Contudo, todos os pontos levantados foram avaliados e as decisões foram implementadas no MeDiNa de tal sorte que, atualmente, alguns pontos estão sendo revisitados por TEDs junto ao



IPR/DNIT, inclusive com a ampliação do número de segmentos experimentais que compuseram a base de dados da calibração original do método.

Outro elemento que pautou as decisões metodológicas assumidas pelo MeDiNa era referente à capacidade que o meio técnico (setor da construção pesada: empreiteiras, supervisoras, projetistas) possuía de assimilar e, efetivamente, implementar essas mudanças. Assim, passando, basicamente, dos ensaios de ISC/CBR dos solos para os atuais ensaios triaxiais dinâmicos para solos e materiais granulares, e de prensas dinâmicas para o ensaio de módulo de resiliência e de fadiga em misturas asfálticas.

No futuro, é provável que maior acurácia à previsão dos esforços gerados pelo tráfego sejam trazidos ao método com a adoção das propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas, das temperaturas diárias e sazonais do revestimento, da velocidade dos veículos, da distribuição horária dos veículos, da adoção da danificação de cada configuração geométrica e de carga dos eixos (abolindo o emprego dos fatores de equivalência de carga do USACE), e da introdução de um maior número de trechos experimentais na base de calibração do MeDiNa.

## 1.2 Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Simples com Juntas Serradas

Os pavimentos de CCP configuram-se em uma alternativa de pavimentação desde 1865, quando tiveram suas primeiras utilizações, em Inverness, na Escócia, e depois em 1872, em Edimburgo<sup>1</sup>. Nos Estados Unidos, o primeiro emprego ocorreu em 1892, em Bellefontaine, Ohio.

No Brasil, seu uso também não é recente, tendo sua utilização pioneira em 1925 na cidade gaúcha de Pelotas, Rio Grande do Sul. Tratava-se de uma via urbana, situada à Rua Álvaro Chaves. Contudo, sua aplicação mais expressiva ocorreu na Estrada do Caminho do Mar, em São Paulo.

Até o final dos anos 2000, segundo fontes da *World Road Association Technical Committee on Concrete Roads*. “*First analysis of the Questionnaire – Pavement Design Methods of Cement Concrete Pavements*”. Abril, 1998, Florence, a Bélgica, os Estados Unidos e a França apresentavam, respectivamente, 41%, 34% e 28% de suas malhas viárias principais revestidas com CCP. No Brasil, estima-se que a participação desta alternativa de pavimentação seja inferior a 5%.

<sup>1</sup> Segundo a *International Society for Concrete Pavements* (ISCP), em seu sítio eletrônico <https://www.concretepavements.org/2015/07/06/2015-marks-150th-anniversary-of-the-worlds-first-concrete-pavement/> - consulta realizada em maio de 2025.

### ***Tipo de Pavimento de Concreto mais usual no Brasil***

Em território nacional, o tipo estrutural de pavimento de CCP mais recorrente é o chamado Pavimento de Concreto Simples (PCS) que congrega as seguintes características estruturais e construtivas, segundo Balbo (2009):

- concreto de alta resistência em relação aos concretos estruturais;
- o CCP é o único responsável por resistir aos esforços de tração na flexão;
- inexistência de armadura distribuída;
- presença de juntas serradas de contração para o controle da retração hidráulica;
- emprego de barras de transferência (BT) de carga, posicionadas exatamente à meia-altura da placa de concreto e nas juntas transversais;
- nas juntas longitudinais estão dispostas as barras de ligação (BL), na mesma profundidade das BT;
- as espessuras das placas oscilam, a depender do tráfego viário, no Brasil, entre 180 e 240 mm;
- as placas possuem a largura geralmente coincidente com a largura da faixa de rolagem;
- o comprimento das placas geralmente varia entre 4,5 m e 6 m;
- na interface da placa de concreto e a base, cimentada ou não, emprega-se manta ou lona plástica de polietileno. Em alguns casos, quando do emprego de bases em concreto compactado com rolo (CCR) ou brita graduada tratada com cimento (BGTC), o emprego alternativo ou concomitante de imprimação com asfalto diluído ou emulsão asfáltica, juntamente com a lona plástica. Essas práticas construtivas visam evitar a aderência entre a base e a placa de CCP, assim como impedir possíveis propagações de fissuras por retração hidráulica das bases cimentadas para as placas de CCP.

### ***As barras de transferência de carga e as barras de ligação***

As BT são empregadas para reduzir os deslocamentos verticais diferenciais entre as placas quando da ação dos eixos viários próximos às juntas transversais. Como consequência estrutural, há uma importante redução nas tensões críticas de tração na flexão das placas de CCP, com redução de espessura de placa de concreto necessária ao dimensionamento estrutural do pavimento. Essas barras de aço não são corrugadas, apresentando comprimento de 460 mm, espaçamento de 300 mm e são dimensionadas pelo esforço cortante que atua sobre elas (seu diâmetro varia entre 20 mm e 40 mm). É importante ressaltar que as barras são pintadas ou engraxadas em metade do seu comprimento para evitar trabalharem aderidas nas duas placas em que estão dispostas, permitindo, assim, a livre

expansão e retração térmica das placas ao longo das variações de temperatura em que ficam submetidas.

Em relação às BL, que são de aço corrugado e, com isso, evitam o deslocamento horizontal relativo entre as placas lateralmente dispostas, possuem comprimento próximo à 750 mm, diâmetro entre 10 mm e 12,5 mm e espaçamento de 500 mm.

### ***O concreto de Cimento Portland***

Obviamente que o concreto a ser aplicado no pavimento é de suma importância, ainda mais no tipo estrutural mais comum no país, em que as tensões de tração na flexão devem ser absorvidas, integralmente, por este material. Portanto, e não se intenta discorrer acerca da tecnologia que engloba este material, a adequada dosagem, pensando em suas propriedades enquanto fresco (trabalhabilidade, segregação, exsudação, retração plástica) e depois de endurecido (retração por secagem, retração térmica de hidratação ou climática, resistência estática, resistência à fadiga, módulo de elasticidade, porosidade e permeabilidade, expansão térmica, tenacidade, resistência à abrasão), influenciarão, sobremaneira, o desempenho do pavimento. Sua influência impacta tanto aspectos funcionais quanto estruturais das placas (BALBO, 2009).

No que será visto adiante, especificamente para o método de dimensionamento preconizado pelo DNIT, a propriedade que maior influência exerce sobre o dimensionamento é a sua resistência à tração na flexão que condiciona sua “resistência à fadiga”. Nesse aspecto, no Brasil, tem sido usual os projetos especificarem concretos com resistência à tração na flexão de 4,5 MPa aos 28 dias.

#### ***1.2.1 Pavimentos de Concreto de Cimento Portland (CCP) – Teorias de Cálculo dos Esforços para o Dimensionamento dos Pavimentos***

Até o advento do computador, os métodos de dimensionamento de pavimentos de CCP baseavam-se em análises empíricas de desempenho ou em análises analíticas destas estruturas, com destaque especial às formulações de *Harald Malcom Westergaard* (1888-1950).

A inserção de condições de contorno, mais ajustadas às práticas construtivas da época, não era possível devido às grandes dificuldades matemáticas de seu equacionamento, como, por exemplo, das BT de carga. Até 1984, em que pese o fato de as BT estarem presentes nos pavimentos de CCP desde a década de 1920, os métodos de dimensionamento desprezavam a existência desses dispositivos. Exemplo disso era o Método da *Portland Cement Association* (PCA), apresentado em 1966, que não previa o efeito desses dispositivos.

A partir da metade da década de 1970, iniciou-se o emprego do Método de Elementos Finitos (MEF) para determinação das tensões nas placas de CCP. Darter *et al.* (1998) consideram a análise numérica uma ferramenta muito eficaz no cômputo das principais variáveis envolvidas no dimensionamento estrutural de pavimentos de CCP.

O método de elementos finitos foi fruto do desenvolvimento do método de elementos discretos, que se baseava na metodologia das diferenças finitas e adotava o tamanho dos elementos discretos das placas, idêntico à área de contato pneu/pavimento, de acordo com Treybig *et al.* (1971).

Os modelos numéricos assumem algumas hipóteses básicas, como o estado plano de tensões em que as deformações ao longo da espessura (eixo “Z”) são nulas. O subleito e as bases, não tratadas com cimento, são considerados, conforme proposto por Winkler<sup>2</sup>, na maioria dos modelos. Quando se opta por analisar estruturalmente o pavimento de concreto formado por base cimentada, levando-se em conta a capacidade das bases cimentadas resistirem a esforços de tração na flexão, assume-se esta camada com dimensões planas idênticas às das placas, com propriedades homogêneas e isotrópicas (BALBO, 1989).

O MEF divide as placas em pequenos elementos, interconectados por um número finito de pontos nodais. Cada nó do elemento de placa em flexão, que em modelos de duas dimensões (2-D) apresentam um total de quatro pontos nodais, possui três graus de liberdade: deslocamento vertical, rotação do eixo “X” e rotação do eixo “Y” (Kok, 1990). Segundo Tia *et al.* (1987), os elementos de placa (2-D) basearam-se na teoria clássica de placas delgadas que assume: espessura da placa pequena em comparação ao seu comprimento e largura; deslocamentos laterais, em flexão, pequenos em relação à espessura da placa; e, por fim, que os planos normais à linha neutra permanecem normais durante a flexão.

#### **1.2.1.1 Método de Dimensionamento de Pavimentos de CCP em uso no Brasil – PCA (1984)**

No Brasil, o método de dimensionamento de pavimento de CCP mais empregado é o proposto pela PCA, em 1984, traduzido para o português por Pitta (1996). Esse procedimento é fruto de melhoramentos realizados sobre o método de 1966 da mesma PCA. Neste antigo método, as tensões críticas eram estimadas pelas formulações analíticas de Westergaard, considerando a superposição de efeitos proposta, sob forma de ábacos, por Pickett e Ray (1951). Cabe salientar que o método da PCA (1984) é indicado pelo DNIT, em seu *Manual de Pavimentos Rígidos (IPR-714)*.

---

<sup>2</sup> O subleito, segundo Winkler, é representado por um sistema de molas elásticas, independentes umas das outras, cuja constante elástica da mola foi chamada de módulo de reação do sistema de apoio “k”, no Brasil (coeficiente de recalque), que exerce uma pressão de reação do subleito a um determinado ponto da placa proporcional à deflexão neste ponto.

Com o avanço da informática, foi possível simular computacionalmente, de forma mais precisa, as condições mecânicas em que as placas de CCP estariam sujeitas em campo. A análise, por meio de modelos de elementos finitos, permitiu uma maior precisão no cálculo das tensões críticas em pavimentos de CCP, aliada à possibilidade de inclusão das barras de transferência de carga no cômputo das tensões que, até então, era impossibilitada pelo uso das equações analíticas de *Westergaard*.

A inclusão das barras de transferência de carga fez migrar a posição crítica do eixo rodoviária sobre a placa, passando da borda transversal para a borda longitudinal externa (próxima ao acostamento). A PCA (1984) simulou numericamente as tensões provocadas por um ESRD de 80 kN tangenciando a borda longitudinal livre e, através da consideração de linearidade entre carga-tensão, calculou as tensões devido a outras configurações de eixos e cargas.

Ao fazer referência a estudos sobre a distribuição dos veículos comerciais nas faixas de rolamento que concluíram que apenas 6% dos veículos trafegam sobre a borda longitudinal externa e os demais veículos trafegam no interior da placa, a PCA (1984) criou o conceito de tensão equivalente, que é a tensão de tração na flexão obtida com a carga na borda longitudinal multiplicada por um fator  $R$  ( $R \leq 1,0$ ). A determinação do fator  $R$  foi realizada da seguinte forma:

- i. Realizaram-se simulações numéricas para o ESRD de 80 kN. Nessas simulações, fez-se o referido eixo solicitar o pavimento na borda longitudinal externa e em posições interiores;
- ii. O ESRD de 80 kN provocava um consumo de resistência à fadiga de  $CRF_{CR}^{PAD}$ , quando simulado na borda, e  $CRF_i^{PAD}$  ao ser simulado mais internamente na placa;
- iii. O Fator  $R$ , dado por  $R = \frac{CRF_i^{PAD}}{CRF_{CR}^{PAD}} \leq 1,0$ , depende da distribuição dos eixos sobre a faixa de rolamento. Quanto mais veículos trafegarem junto à borda longitudinal livre, mais próximo da unidade será o valor de  $R$ , porque mais próximas da tensão crítica serão as tensões assim induzidas, proporcionando um menor número de repetições de carga admissível, próximo ao número de repetições admissível para o caso crítico;
- iv. A PCA (1984) encontrou  $R = 0,89$  para uma distribuição de apenas 6% dos veículos trafegando sobre a posição crítica; portanto, a tensão equivalente é igual a 89% daquela crítica, para uma determinada configuração de eixo e carga, visto que:  $\sigma_{eq} = R \times \sigma_{CR}$ .

Para o desenvolvimento do dimensionamento pelo método indicado pelo DNIT, não é necessário empregar as informações e deduções indicadas anteriormente, uma vez que já estão introduzidas nas tabelas e ábacos de dimensionamento constantes na publicação da PCA (1984) e/ou IPR-714.

No procedimento de 1984, ocorreu também uma reanálise do modelo de fadiga utilizado em 1966, conforme Packard e Tayabji (1985). Novos modelos de fadiga foram determinados através da inserção de estudos de fadiga surgidos após 1966. Quanto à relação de tensão que não provocaria ruptura por fadiga, esta passou de 0,50 para 0,45. Os novos modelos de fadiga estão apresentados nas Equações 1 e 2.

$$N = \left( \frac{4,2577}{R_T - 0,4325} \right)^{3,268} \Rightarrow 0,45 \leq R_T \leq 0,55 \quad [1]$$

$$\log N = \frac{0,9718 - R_T}{0,0828} \Rightarrow R_T > 0,55 \quad [2]$$

Onde:

$N$  – Número de Repetições Admissíveis da Carga que provoca  $R_T$ ;

$R_T$  – Relação entre Tensão de Tração na Flexão Atual e Resistência à tração na Flexão.

Além do critério de fadiga, foi introduzido um critério de ruptura por erosão (bombeamento de finos), fundamentado nos resultados obtidos na *AASHO Road Test*. Segundo PCA (1984) e Pitta (1996), o eixo crítico para análise à fadiga é o ESRD e, para o critério de erosão, a posição crítica é a de canto livre e os eixos múltiplos (ETD – Eixo Tandem Duplo, e ETT – Eixo Tandem Triplo) são os que maiores riscos trazem à estrutura.

Confrontando os dados fornecidos por Childs (1947), com uma análise fundamentada no método da PCA (1984), comprova-se o fato de os eixos múltiplos, no referido método, provocarem maiores danos relacionados à erosão, já que, esses eixos, conforme números apresentados pelo autor, provocam uma maior deflexão nas placas, quando comparados com os eixos simples.

No tocante a tensões críticas (tração na flexão), este estudo também está de acordo com a análise realizada sobre o método da PCA de 1984 em que os ESRD provocam maiores tensões que os ETD (com carga duas vezes maior que o ESRD) e que os ETT (com carga três vezes maior que o ESRD).

O método ainda contempla três possibilidades de consideração da base cimentada, a saber:

- i. Base Cimentada aumentando apenas o valor do módulo de reação do subleito, sem contribuição estrutural;
- ii. Base Cimentada contribuindo estruturalmente na absorção dos esforços fletores, porém sem aderência entre base e placa de CCP;
- iii. Base Cimentada contribuindo estruturalmente na absorção dos esforços fletores, considerando a aderência entre a base e a placa de CCP.

Para Ioannides *et al.* (1992), as bases cimentadas devem ser consideradas como camadas que aumentam a capacidade de suporte da fundação e, principalmente, como camadas elásticas capazes de resistir a esforços fletores de tração na flexão.

Contudo, até o presente momento, no Brasil, não há relatos de dimensionamento de pavimentos de CCP aderidos a bases cimentadas (terceiro caso) ou mesmo considerando a contribuição estrutural da base cimentada sem que esta esteja aderida ao CCP (segundo caso). Os pavimentos de CCP projetados, no Brasil, consideram somente o aumento do módulo de reação do subleito, quando da presença da base cimentada (primeiro caso).

Older (1924) e Balbo (1996) enfatizaram que, por estarem sujeitas a tensões de tração na flexão, as bases cimentadas de pavimentos de CCP, aderidas ou não, também necessitam de verificação à fadiga, fato ainda não presenciado em projetos nacionais. Todavia, segundo Balbo (1996), o método da PCA (1984)/DNIT não considera a possibilidade de danificação da base cimentada por fadiga.

Nesse instante, é importante salientar que os materiais publicados pela Associação Brasileira de Cimento Portland e pelo DNIT, relativas ao método da PCA (1984), fazem menção às placas de concreto trabalhando como revestimento e base do pavimento. Contudo, Balbo (2009) é enfático ao recordar que a utilização do termo base ou sub-base é indiferente na literatura internacional e que a placa de CCP não pode ser chamada de base.

Por fim, no método de 1984, o emprego de acostamentos pavimentados em concreto permite uma importante redução da espessura da placa. Tal diminuição de espessura é consequência da redução das tensões críticas no concreto pela transferência de carga causada pelo intertravamento de agregados (*aggregate-interlock*) que ocorre na junta longitudinal externa, exatamente na interface entre a placa de concreto da pista e do acostamento também em concreto.

Como fora informado para o MeDiNa, não é objetivo deste trabalho descrever todo o método de dimensionamento e as teorias que o sustentam. O livro do *Prof. José Tadeu Balbo* (BALBO, 2009) e inúmeras dissertações e teses do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP) tratam com maior profundidade os aspectos influentes no dimensionamento de pavimentos de CCP.

### ***Análise Crítica do Método da PCA (1984)***

Da mesma forma que comentado para o dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa, o Método da PCA (1984) trouxe importantes avanços em relação ao seu antecessor. Foi possível aplicar a análise computacional para superar algumas limitações presentes anteriormente; possibilitou



considerar as barras de transferência e a limitação dimensional das placas; e introduziu um novo mecanismo de ruptura (erosão) ao dimensionamento.

Entretanto, algumas limitações, sobretudo oriundas do grande espaço de tempo decorrido desde sua implantação sem que atualizações fossem incorporadas, acabam por reduzir a confiabilidade de seu emprego. Desse modo, reitera-se a importante visão do DNIT que já está promovendo pesquisas para a atualização e/ou formulação de um novo método de dimensionamento. Recentemente, o DNIT firmou convênio com a USP<sup>3</sup> para o desenvolvimento de pesquisas com vistas à melhoria da caracterização dos concretos e do método de dimensionamento de pavimentos com placas de CCP.

Já no início dos anos 2000, Balbo (2003) relatava a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de pavimentos de CCP, ajustada às condições de tráfego, clima e materiais do Brasil, que permitiriam, entre outras atividades, a verificação à fadiga das camadas cimentadas de base. Balbo (2009) indica como a primeira limitação do método a ausência de comprovação experimental da equação de fadiga modificada em relação ao método de 1966. Soma-se a esse aspecto, o fato que o modelo adotado no método de 1984 levou em consideração concretos daquela época e oriundos do país de origem (Estados Unidos).

Outra falha nesse método de dimensionamento de pavimentos de CCP consiste na desconsideração do efeito dos gradientes térmicos que, por vezes, pode levar ao subdimensionamento do pavimento, sobretudo em regiões de clima quente, como a Florida (Wu e Tia, 1989) ou o Brasil (Severi, 2002). Balbo (2009) acrescenta que ainda hoje (excetuando os países mais desenvolvidos) há resistências em se admitir os efeitos térmicos no estado tensional dos pavimentos, e os motivos para isso, segundo o autor, devem ser investigados: “*se por ‘economia’ na execução de obras ou por ignorância sobre o assunto*”.

Balbo (2009), ao simular diferenciais térmicos entre 12 °C e 20 °C, comumente encontrados no Brasil, ao aumentar a rigidez do sistema de apoio (de base granular para cimentada, por exemplo), as tensões conjuntas do tráfego e devido ao empenamento da placa provocam uma elevação nas tensões críticas, resultando uma redução da vida de serviço do pavimento. Esse efeito é contrário ao que aponta o Método da PCA (1984), em que o mesmo aumento da rigidez do sistema de apoio é seguido de uma importante redução da espessura da placa de CCP, como efeito da redução das tensões críticas atuantes (estas exclusivas da ação dos eixos viários).

---

<sup>3</sup> Notícia disponível em: <https://pavimentodeconcreto.com/dnit-e-usp-firmam-contrato-para-desenvolver-pesquisas-sobre-pavimento-de-concreto/> - consulta realizada em maio de 2025.



A degradação por fadiga é desprezada nas camadas cimentadas de base e/ou sub-base no método da PCA (1984). Não há uma função de transferência que correlacione, por exemplo, o percentual de consumo de resistência à fadiga, assumido no dimensionamento pela PCA (1984) ao nível de degradação que ocorrerá nas placas de CCP. Por fim, no referido método, inexistiu um nível de confiabilidade atrelado ao seu emprego em pavimentos brasileiros.

Em 2009, o prof. José Tadeu Balbo já profetizava em seu livro:

[...] o que não podemos fazer no Brasil é esperar mais “15 anos” sem discutir as mudanças necessárias e simplesmente mais tarde recorrer a um “novo” e “melhorado” método (talvez da AASHTO, talvez da PCA), importando uma tecnologia que, a bem da verdade, não reflete as condições próprias do País, sob diversos aspectos bastante diferentes daquelas prevalentes em rodovias americanas.

### 1.3 Projetos Licitados recentemente

Para melhor compreender o estado-da-prática dos projetos que foram ou serão implementados no país, tanto em pavimentação asfáltica quanto em CCP, procedeu-se uma consulta aos documentos oficiais, abertos ao público em geral, via *Lei da Transparência*, de importantes projetos de pavimentação no Brasil. Com esse levantamento, foi possível observar padrões de tráfego, tipos de materiais empregados nas distintas camadas das alternativas de pavimentação estudadas neste trabalho, concepções estruturais de projeto (ex.: pavimentos de CCP com ou sem acostamentos em CCP), entre outros fatores. Com isso, tais informações subsidiaram as escolhas de materiais e concepções estruturais assumidas ao longo do desenvolvimento deste estudo.

#### 1.3.1 Projetos de Pavimentos Asfálticos

Em termos de soluções em revestimentos asfálticos, entre os projetos analisados neste trabalho, destacam-se quatro projetos que estão sumarizados na Tabela 4. Como evidenciado, percebe-se o emprego, em algum grau, de análises mecanicistas; tráfegos elevados, entre  $2,3 \times 10^7$  e  $7,79 \times 10^7$ ; bases predominantemente granulares e concretos asfálticos, em sua maioria, com asfaltos modificados.

Observa-se que as análises mecanicistas não empregaram o MeDiNa, impossibilitando a consideração de parâmetros de fadiga mais próximos à realidade nacional e, que estima de maneira mais atual, os afundamentos em trilhas de roda. As análises optaram por processos mais antigos e de materiais empregados em outros países.

Tabela 4 – Dados de licitações recentes – projetos com pavimento flexível

Nº	Ano	Órgão	Rodovia	Tráfego (N <sub>USACE</sub> )	Método projeto	Período do projeto	ISC Subleito (%)	Espessuras dimensionadas (cm)				Acostamento	Observações
								CA	TSD	Base	Sub-base		
1 <sup>4</sup>	2024	DNIT	DNIT BR-424-316 / AL	2,3x10 <sup>7</sup>	Método DNER	10 anos	10	10	-	15 BGS	15 Solo+BGS	Concreto asfáltico	CAP 50/70
2 <sup>4</sup>	2023 (projeto 2020)	DNIT	BR-135/M/A	7,51x10 <sup>7</sup>	Método DNER + Análise mecanicista <sup>1</sup>	10 anos	8,8	11	2,5	15 Solo-Areia-Cimento	15 Solo estabilizado granulometricamente	Concreto asfáltico	Capa 5 cm (AMP 55-75) e 6 cm (CAP 50/70)
3 <sup>5</sup>	2024	DER/PR	DER/PR PR-170 / PRC-466	7,79 x10 <sup>7</sup>	Método do DNER/1979; Método da Resiliência (TECNAPAV); Análise Mecanicista <sup>2</sup>	10 anos	9	14,5	-	23 BGS	20 MS	Concreto asfáltico	AMP 60/85
4 <sup>5</sup>	2024	DER/PR	DER/PR PR-412	3,15 x10 <sup>7</sup>	Método DNER + Método TECNAPAV + método da AASHTO/93+ Análise Mecanicista <sup>3</sup>	20 anos	7	13	-	20 BGS	24 BGS	Concreto asfáltico	Capa 6 cm (AMP 60/85) e 7 cm (CAP 50/70)

Nota 1: deslocamentos verticais máximos no topo do revestimento (DNER PRO-011); Equação fadiga Federal Highway Administration (FHWA, 1976); Fadiga das Camadas Cimentadas de Solo-Cimento (Ceratti, 1991); Deformações de Compressão no Subleito (forma Santucci – Asphalt institute);

Nota 2: deslocamentos verticais máximos no topo do revestimento (DNER PRO-269/94); modelo de fadiga da FHWA (1976); e modelo Deformação Permanente Subleito de Dormon&Metcalf (1971);

Nota 3: modelo de fadiga da SHELL e modelo Deformação Permanente Subleito de Dormon&Metcalf (1971).

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

O emprego de misturas asfálticas modificadas apenas na camada final do revestimento (quando executado em múltipla camada), com as demais camadas asfálticas com CAP 50/70, como

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta em maio de 2025;

<sup>5</sup> Disponível em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta em maio de 2025.

visto em boa parte dos projetos apontados na Tabela 4, atualmente não seria indicado, porque, nas fibras inferiores do revestimento, ocorrem os principais esforços que geram a degradação por fadiga no revestimento, encontrando, nessas fibras, justamente o concreto asfáltico com menor resistência a esse modo de ruptura. Esta análise é corroborada pelo estudo que ensejou o OFÍCIO-CIRCULAR Nº 1844/2025/ASSESSORIA/DPP/DNIT SEDE<sup>6</sup>, em que, por motivos semelhantes aos apontados anteriormente, contraindicam o emprego de *binder* (misturas asfálticas com menores teores de asfalto) nas camadas mais profundas do revestimento asfáltico.

### 1.3.2 Projetos de Pavimentos de Concreto de Cimento Portland

Em termos de soluções em CCP, entre os projetos analisados neste trabalho, destacam-se quatro projetos que estão sumarizados na Tabela 5. Como evidenciado, percebe-se o emprego, em um único caso, de análise mecanicista; tráfego pesado a extremamente pesado, entre  $3,15 \times 10^7$  e  $1,2 \times 10^8$ ; bases predominantemente cimentadas (CCR) e acostamentos em concreto.

Das licitações indicadas na Tabela 5, algumas são dos mesmos trechos apresentados para os pavimentos asfálticos e que tiveram a solução final apontada em CCP, isto é, foram alvo de estudos comparativos entre as soluções para a definição da concepção estrutural a ser executada. Os tráfegos, transformados em solicitações do eixo-padrão, são, em sua maioria, próximos ou superiores a  $10^8$ . O método de dimensionamento empregado foi, em sua maioria, o da PCA (1984), com emprego de BT e de BL, e a base em concreto compactado com rolo estava presente em todas as soluções. O acostamento foi concebido em CCP, o que parece ser uma indicação técnica do DNIT em face a alguns insucessos trazidos pela descontinuidade estrutural e de drenagem do pavimento, segundo relatos em palestras de técnicos da autarquia (conforme já mencionado anteriormente). O critério de ruptura preponderante foi por erosão e as espessuras das placas oscilaram entre 190 e 230 mm.

Em dois casos, o projeto não indicou o emprego de sub-base granular, fato incomum na prática construtiva corrente de pavimentos de concreto, uma vez que o material granular uniformiza a condição de assentamento das bases cimentadas e promove uma adequada condição de permeabilidade para a estrutura do pavimento.

<sup>6</sup> Disponível em: [https://sei.dnit.gov.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.dnit.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) - Código Verificador: 20651387 | CRC: 32827A31 - consulta realizada em junho de 2025;

Tabela 5 – Dados de licitações recentes – projetos com pavimento de concreto

Nº	Ano	Órgão rodoviário	Rodovia	Tráfego	Método projeto	Período	Critério de falha	ISC Subleito (%)	Espessuras dimensionadas (cm)			Barras de transferência e ligação	Acostamento
									Placa	CCR	Granular		
1 <sup>7</sup>	2024	DNIT	DNIT BR-080/DF	1,18 x 10 <sup>8</sup>	PCA (1984)	20 anos	Erosão	7,6	23	10	10 <sup>1</sup> BGS	Sim	CCP
2 <sup>7</sup>	2024	DNIT	DNIT BR-424-316/AL	1,2x10 <sup>8</sup>	PCA (1984)	30 anos	Erosão	10,0	23	10	-	Sim	CCP
3 <sup>8</sup>	2024	DER/PR	DER/PR PR-170 / PRC-466	9,2x10 <sup>7</sup>	PCA (1984)	20 anos	Erosão	9,0	19	10	-	Sim	CCP
4 <sup>8</sup>	2024	DER/PR	DER/PR PR-412	3,15x10 <sup>7</sup>	PCA (1966) <sup>2</sup>	20 anos	Fadiga	7,0	21	-	15 Bica Corrida	Sim	CCP

Nota 1: Conforme o projeto, a sub-base de BGS foi incluída para atendimento ao projeto de drenagem;

Nota 2: Conforme o projeto, também foi realizada uma análise pelo método dos elementos finitos, com utilização do software EverFE 2.26 3D (2019); prevista a adição de Fibra de polipropileno no concreto.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

## 1.4 Orçamento de obras rodoviárias

O custo do ciclo de vida de projetos de pavimentação contempla, de maneira geral, os custos de construção, manutenção e reabilitação, custos operacionais dos usuários e o valor residual ao final da vida útil. De acordo com Peterson (1985), um dos componentes de custo mais importantes, se não o mais importante, é o custo de construção. O custo de construção de uma obra rodoviária é estimado com a utilização de sistemas de custos. Este estudo irá concentrar-se, segundo delineamento metodológico estabelecido, nos custos de construção das distintas alternativas de pavimentação.

### 1.4.1 Sistemas de custos rodoviários

Os sistemas de custos referem-se a métodos e ferramentas utilizados para estimar, controlar e gerenciar os custos envolvidos na construção, restauração ou conservação de rodovias. Esses sistemas

<sup>7</sup> Dados obtidos em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em maio de 2025.

<sup>8</sup> Dados obtidos em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta realizada em maio de 2025.

auxiliam na definição de preços, no orçamento e no acompanhamento financeiro de projetos rodoviários.

No Brasil, o principal sistema de custos para obras de infraestrutura é o Sistema de Custos Referenciais de Obras<sup>9</sup> (SICRO). Conforme Paulino (2021), trata-se de uma ferramenta criada pelo DNIT com o objetivo de definir e mensurar os custos referenciais de obras de infraestrutura, contemplando os valores de insumos e serviços de obras de infraestrutura de transportes de modo pormenorizado.

Para as obras públicas, a nova lei de Licitações e Contratos (Lei 14.133/2021<sup>10</sup>) indica que as obras de infraestrutura de transportes que envolvam recursos da União devem utilizar o SICRO:

§ 2º No processo licitatório para contratação de obras e serviços de engenharia, conforme regulamento, o valor estimado, acrescido do percentual de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) de referência e dos Encargos Sociais (ES) cabíveis, será definido por meio da utilização de parâmetros na seguinte ordem:

I - composição de custos unitários menores ou iguais à mediana do item correspondente do Sistema de Custos Referenciais de Obras (Sicro), para serviços e obras de infraestrutura de transportes, ou do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices de Construção Civil (Sinapi), para as demais obras e serviços de engenharia;

II - utilização de dados de pesquisa publicada em mídia especializada, de tabela de referência formalmente aprovada pelo Poder Executivo federal e de sítios eletrônicos especializados ou de domínio amplo, desde que contenham a data e a hora de acesso;

III - contratações similares feitas pela Administração Pública, em execução ou concluídas no período de 1 (um) ano anterior à data da pesquisa de preços, observado o índice de atualização de preços correspondente;

IV - pesquisa na base nacional de notas fiscais eletrônicas, na forma de regulamento.

§ 3º Nas contratações realizadas por Municípios, Estados e Distrito Federal, desde que não envolvam recursos da União, o valor previamente estimado da contratação, a que se refere o caput deste artigo, poderá ser definido por meio da utilização de outros sistemas de custos adotados pelo respectivo ente federativo.

(grifo nosso)

Ainda, percebe-se a adoção do SICRO por órgãos rodoviários estaduais, como, por exemplo, o Departamento de Estradas de Rodagem (DER) de Pernambuco, o DER do Estado de Rondônia e a Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade de Santa Catarina. Além do SICRO, há outros sistemas de custos, como o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil<sup>11</sup> (SINAPI), por exemplo, utilizado em obras de pavimentação urbana especialmente por prefeituras. Ademais, diversos estados ou municípios dispõem de sistemas de custos próprios, podendo-se citar, por exemplo, o Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Paraná<sup>12</sup>, o Departamento de

<sup>9</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro> - consulta realizada em março de 2025;

<sup>10</sup> Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/lei/14133.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/14133.htm) - consulta realizada em março de 2025.

<sup>11</sup> Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx> - consulta realizada em março de 2025;

<sup>12</sup> Disponível em: <https://www.der.pr.gov.br/Pagina/Normas-e-Custos-Rodoviaros> - consulta realizada em março de 2025;

Estradas de Rodagem de São Paulo<sup>13</sup> e a Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes (GOINFRA)<sup>14</sup>.

De acordo com o Manual do SICRO, a estrutura do orçamento de uma obra rodoviária contempla, de forma geral, a definição dos custos diretos e indiretos e o preço de venda. O custo direto de uma obra é o resultado da soma de todos os custos dos serviços necessários à sua execução, sendo obtido pelo produto das quantidades de insumos (equipamentos, mão de obra, materiais, atividades auxiliares e transportes) empregados nos serviços pelos seus respectivos custos.

O custo indireto de uma obra é o custo de toda a infraestrutura necessária para a sua execução e corresponde à soma dos custos auxiliares de apoio, tais como instalação e manutenção de canteiros de obras, alojamentos, instalações industriais, administração local, mobilização e desmobilização de equipamentos e pessoas. Já o preço de venda consiste no custo total dos serviços (diretos + indiretos) acrescido das respectivas parcelas de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI).

Os custos dos serviços são definidos com base nas composições de custos unitários. A composição de custos é uma ferramenta que permite definir qualitativa e quantitativamente os insumos necessários à realização de um serviço. As quantidades e os consumos dos insumos (mão de obra, equipamentos, materiais, atividades auxiliares e transportes), ponderados por seus custos unitários, acrescidos da parcela de bonificação e despesas indiretas, resultam no preço final do serviço. No SICRO, as composições de custo são publicadas com periodicidade trimestral para todas as Unidades da Federação, considerando parâmetros locais de preços (Paulino, 2021).

De acordo com Teles (2024), a natureza analítica do SICRO permite que seus relatórios avancem para além do custo de um serviço, incluindo dados técnicos detalhados, como a produção da equipe, o consumo e a massa dos materiais, a potência e capacidade dos equipamentos. Assim, o SICRO se torna uma valiosa e abrangente fonte de referência técnica para diversos estudos e análises.

Em relação à utilização das composições de custo para a definição dos preços, é importante destacar que o SICRO não é uma tabela rígida, mas sim um sistema de referência de custos para obras rodoviárias, que deve ser ajustado pelo orçamentista conforme as particularidades de cada projeto<sup>15</sup>. Ainda, durante a elaboração de um orçamento utilizando o SICRO, devido às constantes atualizações, o orçamentista deve atentar sempre para outros documentos normativos (verificar portal - sítio - do DNIT ou o Diário Oficial da União na Imprensa Nacional) e/ou as revogações pertinentes. Esses

<sup>13</sup> Disponível em: <https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/DocumentosDER.aspx#> - consulta realizada em março de 2025;

<sup>14</sup> Disponível em: <https://www.goinfra.go.gov.br/tabela-de-composicao/114> - consulta realizada em março de 2025;

<sup>15</sup> Manuais do SICRO – Disponíveis em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro> - consulta realizada em março de 2025.

documentos disciplinam os critérios relacionados ao BDI, aos custos de transporte e aquisição dos materiais asfálticos, entre outros (Paulino, 2021).

A Figura 3 apresenta, para fins de exemplificação, a composição de custo do SICRO para o serviço de “Base ou sub-base de macadame seco com brita comercial”.

Figura 3 – Exemplo de Composição de Custo do SICRO

CGCIT		DNIT				
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Paraná	FIC 0,01046			
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2025	Produção da equipe 84,62 m³			
4011279 Base ou sub-base de macadame seco com brita comercial - 100% Proctor modificado		Valores em reais (R\$)				
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9514 Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido - 130 kW	1,00000	1,00	0,00	286,8039	107,9426	286,8039
E9530 Rolo compactador liso vibratório autopropelido por pneus de 11 t - 97 kW	2,00000	0,53	0,47	256,2937	113,2540	378,1301
Custo horário total de equipamentos						664,9340
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824 Servente	2,00000	h	28,3906		56,7812	
Custo horário total de mão de obra					56,7812	
Custo horário total de execução					721,7152	
Custo unitário de execução					8,5289	
Custo do FIC					0,0892	
Custo do FIT					-	
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário	
M0808 Brita 4	1,26000	m³	114,0136		143,6571	
M1135 Pó de pedra	0,14000	m³	98,7396		13,8235	
Custo unitário total de material					157,4806	
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares						
Subtotal					166,0987	
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
M0808 Brita 4 - Caminhão basculante 10 m³	5914651	1,89000	t	2,6200	4,9518	
M1135 Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	5914651	0,21000	t	2,6200	0,5502	
Custo unitário total de tempo fixo					5,5020	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT		Custo Unitário	
			LN	RP	P	
M0808 Brita 4 - Caminhão basculante 10 m³	1,89000	tkm	5914359	5914374	5914389	
M1135 Pó de pedra - Caminhão basculante 10 m³	0,21000	tkm	5914359	5914374	5914389	
Custo unitário total de transporte						
Custo unitário direto total					171,60	

Obs:

Fonte: SICRO

#### 1.4.2 Estudos anteriores que realizaram comparações de custos de construção

Primeiramente, é importante frisar que este estudo se limita a avaliar os preços estimados de implantação de diferentes soluções de estruturas de pavimentação, não sendo o escopo a análise do ciclo de vida dos pavimentos.

Realizando uma consulta a estudos publicados no Brasil, é possível encontrar alguns trabalhos que realizaram comparações dos custos de construção de estruturas de pavimentos, considerando soluções em CCP e CA. Entende-se não ser adequado considerar estudos de custo realizados em outros países, em função das diferenças nos métodos de projeto, de construção e dos custos dos materiais em relação à realidade brasileira.

Bonfim *et al.* (2024) realizaram uma pesquisa bibliográfica em diferentes bases de dados (SciELO, Google Scholar, ScienceDirect, Periódicos Capes e Biblioteca Digital Brasileira de Teses



e Dissertações), utilizando como critérios de pesquisa trabalhos publicados entre os anos de 2000 e 2023 no Brasil, com temas diretamente relacionados à análise de custos entre pavimento rígido e flexível. Ao todo, os autores encontraram 23 pesquisas relacionadas, sendo oito artigos científicos, 13 monografias, uma dissertação de mestrado e uma tese de doutorado. Em relação aos custos de implantação das estruturas de pavimentos, os autores selecionaram 10 trabalhos, nos quais sete autores obtiveram resultados demonstrando que o pavimento rígido possui maior custo de implantação em comparação ao pavimento flexível (percentuais entre 22 e 74% de diferença, com média de 38,42%). No entanto, outras três pesquisas indicaram que o custo de implantação do pavimento flexível foi maior que o pavimento de concreto, em percentagens de 15 a 44%.

Cabe destacar que os estudos abordados por Bonfim *et al.* (2024) têm suas particularidades, sendo elaborados em períodos e condições diversas de dimensionamento, tráfego e custos. Ademais, percebe-se que a maioria dos estudos relacionados ao tema não apresentam todas as premissas utilizadas no dimensionamento e na definição dos custos e outros estudos comparam períodos de projeto e tráfego diferentes. Tal situação dificulta uma análise e conclusão geral a respeito das comparações.

Nesse contexto, na Tabela 6, são apresentados resultados de alguns estudos que avaliaram os custos de implantação de pavimentos, comparando as soluções com CCP e CA. Conforme os dados apresentados na Tabela 6, observam-se diferenças importantes entre os estudos, ao encontro do levantamento realizado por Bonfim *et al.* (2024). Para alguns estudos, a solução de pavimento com revestimento asfáltico tem menor custo de implantação; em outros, maior custo em comparação ao pavimento rígido. Cabe destacar, novamente, que as análises de custo são específicas para cada projeto, dependendo, especialmente, das condições de tráfego, da localização da obra e, com grande destaque, dos critérios adotados pelo projetista para dimensionamento e seleção de materiais.

Diante disso, é possível observar uma lacuna de estudos no país que abordem os custos de implantação para diferentes soluções de pavimentação de uma forma mais abrangente, juntamente com a avaliação do impacto do tráfego, do desempenho dos ligantes asfálticos modificados disponíveis no mercado brasileiro, dos diferentes métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos e dos consumos dos insumos mais relevantes.



Tabela 6 – Alguns estudos brasileiros que relacionam custos de implantação de pavimentos para diferentes soluções

Referência	Tipo	Ano	Sistema de Custos	Tráfego (N <sub>USACE</sub> )	Totais Eixos	Valor estimado (R\$ / km)				Observações
						Pavimento concreto	Pavimento flexível		Pavimento semirrígido	
							CAP 50/70	Polímero		
Kalinski (2017)	TCC	2017	SICRO2-PR e SINAPI-PR	2,66x10 <sup>8</sup>	Ver ref.	1.144.787,09	1.063.968,88			Pista 7,2 m; Acostamentos 3,0 m
Cavalet et. al (2019) <sup>1</sup>	Artigo	2019	SICRO-SC	5,63x10 <sup>7</sup>	Ver ref.	1.205.237,40		1.742.275,73		Pista 7,0 m; Acostamentos 2,5 m
Pereira (2022) <sup>2</sup>	TCC	2022	SICRO - RS	1,83x10 <sup>7</sup>	Ver ref.	3.180.458,47	2.773.578,72	2.222.706,59	-	Pista 7,2 m; Acostamentos com TSD
				5,48x10 <sup>7</sup>	Ver ref.	3.227.771,86	3.183.943,08	2.454.029,42	-	
				1,00x10 <sup>8</sup>	Ver ref.	3.305.796,36	3.375.146,60	2.642.854,62	-	
				5,02x10 <sup>8</sup>	Ver ref.	3.392.122,01	4.137.251,84	3.047.669,57	-	
Teles (2024) <sup>3</sup>	Mestrado	2024	SICRO-SP	1,00x10 <sup>8</sup>	Ver ref.	2.566.738,51	-	-	4.829.691,03	Pista 7,2 m; Acostamento 2,5 m
Vello <i>et al.</i> (2024)	Pós Graduação	2024	SICRO-ES	2,00x10 <sup>6</sup>	Ver ref.	1.548.813,25	798.708,00			Pista 7,0 m; Sem acostamento

Nota 1: Pavimento flexível dimensionado utilizando o MeDINA; Períodos de projeto diferentes para as duas soluções;

Nota 2: Pavimento flexível dimensionado utilizando o FlexPAVE™;

Nota 3: Considerou as estruturas indicadas no Manual de Custos Médios Gerenciais do DNIT.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

## 1.5 Emissões de CO<sub>2</sub>

As mudanças climáticas são um dos desafios mais importantes enfrentados pela humanidade atualmente. A conscientização global tem elevado o tema da sustentabilidade a uma posição central em diversos setores, incluindo a pavimentação rodoviária, que demanda grandes volumes de materiais e processos, tornando a avaliação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) uma prática essencial, embora pouco explorada.

Para reduzir as emissões de GEE e evitar impactos adversos causados pelas mudanças climáticas, o Acordo de Paris, de 2015, apela para que os países se esforcem para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C até 2045, quando comparado ao nível pré-industrial (IPCC, 2018), sendo a mitigação das emissões de GEE pilar central neste cenário.

Para alcançar uma mitigação significativa e eficaz, é importante quantificar e reduzir a quantidade de GEE produzida pela infraestrutura de transporte. A construção, reabilitação e manutenção de pavimentos rodoviários exigem a obtenção, processamento, transporte, fabricação e instalação de grandes volumes de materiais. Essas atividades consomem uma quantidade considerável de energia e geram impactos importantes em termos de sustentabilidade.

A quantificação das emissões permite a tomada de decisões que priorizem materiais de menor impacto e métodos de construção mais sustentáveis, sendo essencial que o setor da pavimentação analise não apenas a viabilidade econômica, mas também a viabilidade ambiental baseada em emissões de GEE.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é a ferramenta mais utilizada para quantificar essas emissões e outros impactos ambientais. A padronização do ACV foi estabelecida pela *International Organization for Standardization* (ISO 14040). Posteriormente, a ISO 14044 foi desenvolvida para detalhar os requisitos e orientações específicos para a condução de estudos, consolidando as diretrizes internacionais da metodologia. Conforme a ABNT NBR ISO 14040, a ACV é definida como a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”.

Um ACV constitui-se de quatro fases distintas: 1) definição de objetivo e escopo; 2) análise de inventário; 3) avaliação de impacto; 4) interpretação dos resultados. Ao contrário de processos e serviços em outros setores, a ACV ainda é relativamente inicial na aplicação em infraestruturas civis (Inyim *et al.*, 2016). A aplicação da ACV em pavimentos rodoviários foi realizada inicialmente nos

anos de 1996 (Häkkinen e Mäkälä, 1996), 1998 (Horvath e Hendrickson, 1998) e 2001 (Strippel, 2001), ganhando terreno em diversos outros trabalhos posteriormente.

A definição do objetivo de uma ACV é o ponto de partida que estabelece o propósito e a aplicação dos resultados. O escopo deve especificar qual é a função do produto ou serviço avaliado e definir uma unidade funcional. A unidade funcional é uma medida quantitativa do desempenho do produto, servindo como base de referência para a comparação de diferentes sistemas, por exemplo, “1 km de pavimento construído”. Além disso, no escopo, definem-se as fronteiras do estudo, ou seja, quais processos e etapas da cadeia de valor serão incluídos ou excluídos (por exemplo, “da extração da matéria-prima até a saída da fábrica” ou “da extração até o final da vida de serviço”); quais impactos ambientais serão analisados (por exemplo, potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, etc.); e, define-se o tipo e a qualidade dos dados necessários para a análise (por exemplo, dados informados por empresas, dados de literatura, etc.).

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a parte central do estudo de ACV e todos os impactos significativos (entradas e saídas) relacionados à vida útil do sistema analisado são quantificados e compilados (Barbieri *et al.*, 2021). A análise de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (ABNT, 2009a). A ISO 14044 define o resultado da análise do ICV como o “resultado de uma análise de inventário do ciclo de vida que cataloga os fluxos que cruzam os limites do sistema e fornece o ponto de partida para a avaliação do impacto do ciclo de vida”.

Após a obtenção do ICV, a análise de impacto de ciclo de vida (AICV) é definida pela norma ISO 14040 como um processo que envolve a conversão dos dados do inventário em categorias de impacto. Nessa fase, os dados de inventário são agrupados em categorias de impacto, ou seja, os dados de inventário dentro de cada categoria são convertidos em uma unidade comum. Para o potencial de aquecimento global, por exemplo, o metano e o óxido nitroso são convertidos em equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq), usando fatores de caracterização. Isso permite somar o impacto total de todos os gases na categoria e obter um único número representativo (Guo e Xu, 2021).

Por fim, na análise dos resultados de uma ACV, examina-se os resultados para identificar quais fases do ciclo de vida, quais processos ou quais produtos são responsáveis pela maior parte das emissões de CO<sub>2</sub>eq. Pode-se, também, a partir dos resultados, investigar a sensibilidade de cada entrada no sistema e como essa afeta os valores totais observados. As conclusões obtidas devem responder ao objetivo inicial do estudo. É fundamental, segundo a ISO 14040, que as limitações e incertezas do estudo sejam explicitamente declaradas.

A ACV de um pavimento rodoviário é tipicamente dividida em grupos de emissões, que englobam as seguintes fases: Produção de insumos; Transporte para obra; Execução da obra (construção); Uso e manutenção e; Fim da vida útil. Estes grupos são descritos na norma ISO 21930:2017 que fornece os princípios, especificações e requisitos para desenvolver uma declaração ambiental de produto, para produtos e serviços usados em qualquer tipo de obra de construção, e estão demonstrados na Figura 4.

Figura 4 – Limites do sistema definidos em grupos para obras de construção – ISO 21930

Figura 1 Limites do sistema definidos em grupos para obras de construção ISO 21950

Informações sobre o ciclo de vida das obras de construção dentro dos limites de um sistema														
A1-A3			A4-A5		B1-B7					C1-C4				D
Estágio de Produção			Estágio de Construção		Estágio de Uso					Estágio Final				
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4*	B5	C1	C2	C3	C4	
Extração da Matéria Prima			Transporte para Obra		Uso					Demolição				Potenciais benefícios líquidos da reutilização, reciclagem e/ou recuperação de energia além dos limites do sistema
Transporte para Usina			Execução do Pavimento		Manutenção (incl. produção, transporte e descarte de material					Transporte para descarte ou processamento				
Produção do Material			Reparos (incl. produção, transporte e descarte de material					Processamento do descarte						
			Substituição (incl. produção, transporte e descarte de material					Disposição do descarte						
			Reforma (incl. produção, transporte e descarte de material											
			B6 Uso operacional de energia											
			B7 Uso operacional de água											

\*(B4) não aplicável ao nível do produto

Fonte: Adaptado de Shacat (2024)

As análises de ACV são limitadas por fronteiras geralmente referidas como *Cradle to Gate* (do berço ao portão), *Cradle to Grave* (Do berço ao túmulo) e *Cradle to Cradle* (do berço ao berço). A abordagem *Cradle to Gate* é o escopo de análise mais curto; ele avalia o impacto ambiental de um produto desde a extração das matérias-primas (“berço”) até o momento em que o produto final sai da usina (“portão”). A análise *Cradle to Gate* refere-se ao somatório dos grupos A1 (Extração da matéria-prima), A2 (Transporte para usina) e A3 (Produção do material), e é frequentemente utilizada para calcular a pegada de carbono de um produto antes de ser entregue ao seu serviço, sendo a base para as declarações ambientais de produto.

A abordagem *Cradle to Grave* inclui todas as etapas do ciclo de vida do produto: desde a extração das matérias-primas (“berço”), passando pela produção, transporte, execução e uso, até o seu fim de vida (“túmulo”), por descarte. O objetivo do *Cradle to Grave* é ter uma visão de todos os impactos ambientais que um produto causa ao longo de sua existência e é referida ao somatório dos grupos A1 até C4 conforme a Figura 4.

Já o cenário *Cradle to Cradle* (Do berço ao berço) busca avaliar um ciclo de vida circular da matéria-prima utilizada. Nesse modelo, o fim da vida de um produto é o “berço” de outro. Essa abordagem leva em conta ao Grupo D da Figura 4, contemplando potenciais benefícios de reciclagem e reutilização do material, que poderiam evitar novas emissões.

Para investigações com ACV de projetos de pavimentos, é usual que análises sejam feitas dentro dos grupos A1 até A3, contabilizando as emissões de produção dos principais materiais utilizados, como, por exemplo, misturas asfálticas ou CCP, entre outros; no grupo A4 representando o transporte destes materiais até a obra, e posteriormente no grupo A5 contabilizando as emissões da execução dos pavimentos. A partir dessas análises, um valor total de A1 - A5 é obtido, e representa o montante total de emissões desde a extração dos materiais, até a entrega do pavimento pronto. Esses estágios (produção de insumos + transporte para obra + construção do pavimento) serão abordados nas análises no escopo do presente estudo.

Análises considerando as fases de uso e de final de vida de serviço ainda são incipientes na literatura, visto o somatório de dificuldades de previsão de comportamento dos pavimentos, consumo de combustíveis frente à degradação da superfície de rolagem, discretização da frota, e de que maneira os impactos dos resíduos finais são contabilizados.

### ***1.5.1 Emissões de GEE em misturas asfálticas***

As emissões de carbono ocorrem em todas as etapas da cadeia do pavimento asfáltico, sendo o ligante asfáltico um dos principais contribuintes do total de GEE emitidos. Esse panorama pode ser constatado ao observar-se que, mesmo constituindo apenas 5% (em média) em massa das misturas asfálticas, o ligante pode representar até 94% de toda emissão referente aos materiais utilizados (Shacat *et al.*, 2024).

O ligante asfáltico é um dos muitos produtos das refinarias de petróleo, obtido a partir do processamento do óleo cru. Embora seja um componente essencial para misturas asfálticas, ele representa uma parcela relativamente pequena da produção total de uma refinaria.

Em comparação aos combustíveis como gasolina, diesel e querosene de aviação, o ligante asfáltico responde por apenas 2% da produção global das refinarias. Além disso, as emissões do ligante asfáltico são aproximadamente 60% menores do que as de combustíveis, como gasolina, diesel e querosene de aviação. Essa diferença se deve ao fato de o ligante asfáltico não ser consumido por combustão em sua aplicação final, ao contrário dos combustíveis de transporte (Barry *et al.*, 2024).

É importante ressaltar que os meios de extração do petróleo, sejam *On-Shore* ou *Off-Shore*, combinados à rota de transporte até os terminais, e posteriormente às refinarias, impactam significativamente os valores de emissões de produção dos ligantes asfálticos, sendo, contudo, uma informação de difícil acesso na literatura técnica disponível.

Entre dados disponibilizados no Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2025), por meio de divulgação digital, cita que as extrações terrestres apresentam média de 27,4 KgCO<sub>2</sub>eq/Boe (barril de óleo equivalente), enquanto as extrações marítimas, em média, 14,1 KgCO<sub>2</sub>eq/Boe. Entretanto, a discretização das emissões de transporte desse óleo até as refinarias não se encontra divulgada.

Em um estudo robusto, a Associação Europeia de Betume (Eurobitume) (2025) investigou diversas rotas de produção do ligante asfáltico utilizado na União Europeia, desde a obtenção do petróleo, passando pelo transporte, até o final do processo de refino e com o ligante pronto para distribuição, chegando a emissões médias de 530 KgCO<sub>2</sub>eq/t. Os autores citam que o principal contribuinte é a extração do petróleo bruto fornecido à refinaria (70%). O transporte de petróleo bruto para a refinaria contribui com 8% adicionais, a destilação atmosférica e a vácuo do petróleo bruto contribuem com outros 14%. O armazenamento do produto é o responsável pelas demais emissões.

De acordo com Barry *et al.* (2024), as emissões médias do berço ao portão da produção, transporte e armazenamento de ligantes são de 88 tCO<sub>2</sub>eq/milha de pista na América do Norte.

#### **1.5.1.1. Produção de Matérias-Primas (A1)**

A extração, o transporte e a fabricação dos componentes básicos das misturas asfálticas geram emissões de GEE. Os principais materiais utilizados são o ligante asfáltico e os agregados minerais, como os materiais britados. Adicionalmente, tintas e emulsões contabilizam emissões de CO<sub>2</sub>, embora em um nível muito pequeno dentro das emissões totais. Algumas formulações de asfalto também incorporam aditivos modificadores para otimizar suas propriedades e desempenho. Ademais, o uso

de cal hidratada também é recorrente em projetos de dosagem de misturas asfálticas. Todas essas etapas iniciais de produção dos materiais são classificadas como produção primária (A1).

A complexidade da cadeia de suprimentos de petróleo e do processo de refino torna desafiadora a quantificação das emissões de GEE na produção de ligantes asfálticos. As estimativas de emissões para a fabricação de ligantes asfálticos nos EUA, no entanto, já foram calculadas e variam de 390 a 578 kg de CO<sub>2</sub>eq por tonelada, de acordo com Mukherjee (2016) e Asphalt Institute (2019). Essas emissões são geradas em diversas fases: extração e transporte do petróleo bruto, operações de refinaria, transporte do ligante asfáltico para terminais, operações de terminais e a fabricação e mistura de aditivos ao ligante asfáltico.

Em termos de emissões de carbono por massa, os agregados apresentam uma pegada significativamente inferior à do ligante asfáltico. Para o cenário norte americano, a extração e o processamento de agregados (A1) geram cerca de 1,8 kg de CO<sub>2</sub>eq por tonelada. Considerando que uma mistura asfáltica virgem geralmente contém 95% de agregados, essa etapa contribui com aproximadamente 1,7 kg de CO<sub>2</sub>eq por tonelada de mistura. Em termos gerais, em uma mistura com 95% de massa de agregados e apenas 5% de ligante asfáltico, a produção dos agregados representa apenas 6% da pegada de carbono da fase de materiais (A1) e apenas 3% das emissões totais de GEE “do berço ao portão” (A1-A3), enquanto o ligante é responsável por 94% do total de emissão do grupo A1 (Shacat *et al.*, 2024).

#### **1.5.1.2. Transporte até a Usina de Mistura Asfáltica (A2)**

As considerações acerca do grupo A2 referem-se ao gasto energético em termos de combustível para o transporte de ligantes, agregados e demais insumos até a usina de produção da mistura asfáltica. Esse transporte é influenciado diretamente pelas distâncias médias de transporte (DMT) dos insumos, vinculados à posição da usina dentro do cenário de distância para a obtenção dos materiais. Usinas conjugadas aos mesmos sítios de produção dos agregados impactam em menos emissão de gases do efeito estufa vinculados ao transporte, tendo em vista as menores distâncias de transporte. Usinas que demandam DMTs excessivas dos agregados conduzem a um aumento expressivo das emissões do grupo A2 por tonelada de mistura produzida, visto o fato dos agregados constituírem aproximadamente 95% da massa total da mistura asfáltica.

Diferenças significativas para A2 são esperadas dada a existência de variabilidades regionais na oferta de agregados, possibilitando impactos nas DMTs que levam a importantes diferenças nos



valores de emissão encontrados neste grupo. Conforme Miller *et al.* (2024), investigando o cenário norte americano, Flórida e Louisiana apresentaram valores medianos de A2 de 36,32 kgCO<sub>2</sub>eq/t e 39,42 kgCO<sub>2</sub>eq/t, respectivamente, enquanto a mediana de todos os outros estados foi de 3,65kg CO<sub>2</sub>eq/t.

#### **1.5.1.3. Etapa de Produção da Mistura Asfáltica (A3)**

A fase de produção da mistura asfáltica gera emissões de GEE através do consumo de combustíveis nas instalações e pela eletricidade utilizada. As fontes de emissão nesse processo incluem o uso de combustível nos queimadores, aquecedores de óleo quente e geradores próprios, além do consumo de equipamentos móveis como carregadeiras e caminhões, e outros equipamentos movidos à combustão que auxiliam nas operações da usina de asfalto. A principal fonte isolada de emissões de GEE durante a produção da mistura é o consumo de combustível nos queimadores.

É sabido que etapa de produção da mistura é amplamente classificada como a mais impactante do ponto de vista ambiental por seu alto consumo de combustíveis fósseis; o uso de outras formas de energia, como a eletricidade, para o funcionamento da usina como um todo, incluindo o aquecimento dos agregados (Wang *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016; Alzard *et al.*, 2019) é uma tendência.

Estudos demonstram que usina com queimadores a gás emitem menos CO<sub>2</sub> por tonelada produzida do que aquelas movidas a óleo. Conforme Peng *et al.* (2015), as principais fontes de energia são o óleo pesado e o gás natural, empregados na fase de aquecimento do agregado. Nessa etapa, as emissões de carbono se reduziram em 27,72% quando o gás natural substituiu o óleo pesado. Também se constatou que as usinas que priorizam o uso de eletricidade como fonte energética principal tendem a apresentar melhor desempenho ambiental, enquanto aquelas que utilizam óleo pesado produzem, em geral, maior impacto de toxicidade humana (Krau *et al.*, 2023).

Conforme Hanson *et al.* (2012), existe uma forte correlação entre as emissões de CO<sub>2</sub> e a temperatura de aquecimento dos insumos para a produção da mistura ( $R^2 = 0,976$ ), a umidade dos agregados também foi um preditor importante. Tais achados demonstraram a importância do uso de agregados estocados secos e o uso de misturas mornas para a minimização das emissões de GEE.

#### **1.5.1.4. Construção de Pavimentos (A4-A5)**

As emissões de GEE durante a construção de pavimentos asfálticos incluem o consumo de combustível durante o transporte de materiais de pavimentação para o local da obra (A4) e o consumo



de combustível associado às operações de pavimentação (A5). Quantificar as emissões de GEE durante a construção inicial de pavimentos é relativamente direto. Em geral, as emissões de GEE relacionadas à construção de pavimentos asfálticos (A5) são relativamente baixas (Souza *et al.* 2022), geralmente em torno de 10% ou menos das emissões do berço ao portão (A1-A3) relacionadas à produção da mistura (Butt *et al.*, 2019). Exceções podem ser encontradas para agregados e misturas asfálticas transportados por longas distâncias entre o local de produção até a obra – grupo A4 (Santero *et al.*, 2011).

#### **1.5.1.5. Emissões de CO<sub>2</sub> em cada etapa da cadeia produtiva do pavimento asfáltico**

Em relação ao processo “*cradle to gate*” (A1 – A3) da mistura asfáltica, diferentes valores podem ser encontrados na literatura, geralmente influenciados pelas variabilidades de emissões dentro dos grupos A1, A2 e A3 citados anteriormente. Shacat *et al.* (2024) trazem o valor de 53,7 kgCO<sub>2</sub>eq/t de mistura asfáltica produzida, já considerando usinas mais novas no cenário norte americano. Krau *et al.* (2023), a partir de uma análise de doze usinas brasileiras, estimam somente para o grupo A3, emissões de entre 15,24 a 37,75 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> que se aplicados a uma densidade aparente de 2,40 g/cm<sup>3</sup> levam a valores de 6,35 a 15,73 kgCO<sub>2</sub>eq/t.

Esses valores, ficam abaixo do apresentado por Shacat *et al.* (2024), que indicam a emissão de A3 de 20,5 kgCO<sub>2</sub>eq/t. Tais variações são consideradas normais dado que cada cenário apresenta suas particularidades no processo de usinagem. Souza *et al.* (2022) apresentam o valor de emissão 227,94 tCO<sub>2</sub>eq/km (em toneladas por quilometro para A1-A5, até o pavimento pronto), para uma estrutura de pavimento no cenário brasileiro. Convertendo esse dado e estimando uma densidade aparente de 2,40 g/cm<sup>3</sup> da mistura asfáltica, obtém-se um valor próximo a 94 kgCO<sub>2</sub>eq/t de mistura asfáltica. O mesmo cálculo de A1-A5 é feito por Barry *et al.* (2024) no cenário norte americano, e apresenta o valor de 224 tCO<sub>2</sub>eq/milha, o que, considerando a estrutura de pavimento utilizada pelos autores, resultaria em um valor aproximado de 69,31 kgCO<sub>2</sub>/t de mistura asfáltica.

#### **1.5.2 Emissões de GEE em pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland**

Assim como para os pavimentos flexíveis, a emissões de CO<sub>2</sub> acontecem ao longo de toda a cadeia de produção de insumos e processos dos pavimentos rígidos. Dentro desse cenário, as emissões geradas para a produção de CP impactam de maneira importante as emissões totais dos pavimentos de CCP.

Durante sua produção, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é gerado de duas maneiras principais ao longo da produção do cimento, sendo elas: a conversão do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), liberando  $\text{CO}_2$  como subproduto; e o gasto energético para o aquecimento dos fornos de calcinação (Andrew *et al.* 2018), onde a depender do tipo de combustível utilizado as emissões podem ser impactadas.

Em relação às etapas onde as emissões acontecem, considera-se que 50% resultam da calcinação do calcário, e outras 40% são geradas pela queima de combustíveis fósseis utilizados para aquecer os fornos de cimento (Imbabi *et al.*, 2012). Lehne e Preston (2018) também discretizam as contribuições de emissões em 50% para o processo de calcinação, 40% pela queima de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos, e outros 10% divididos em exploração e transporte do calcário; moagem e preparação de material primário; e resfriamento, moagem, mistura e transporte final do produto. Os autores relatam também que a eficiência energética, a substituição de combustíveis e a substituição do clínquer são os caminhos para uma menor pegada de carbono na produção do cimento.

#### ***1.5.2.1 Emissões de $\text{CO}_2$ em cada etapa da cadeia produtiva do pavimento de CCP***

Os grupos A1 - A5 foram anteriormente demonstrados dentro da solução asfáltica e guardam semelhanças para com as soluções em concreto. Dessa forma, nesta seção, apenas os valores característicos encontrados para os pavimentos rígidos serão apresentados.

A extração, o transporte e a fabricação dos componentes básicos dos pavimentos de CCP geram emissões de GEE. Os principais materiais utilizados são o CP, os agregados minerais e o aço empregado nas placas de concreto. Adicionalmente, outros materiais são utilizados, como lonas, graxas, discos de serragem de juntas, tintas e emulsões asfálticas; entretanto, estes demonstram pequeno impacto nos valores globais de emissão ao longo do processo A1-A3. O transporte (A2) dessas matérias-primas é diretamente influenciado pelas DMTs que os produtos percorrem até o seu destino, assim como discutido para a produção das misturas asfálticas.

As emissões ao final do processo A3 do CCP, quando este está pronto para ser utilizado, são consideradas de maior contribuição para a pegada de carbono dos pavimentos rígidos (Teles *et al.*, 2024). No somatório dessas emissões, o cimento representa cerca de 85% da pegada de carbono de uma mistura de concreto, embora represente apenas cerca de 10-15% da mistura em peso (Cement Association of Canada, 2025). Para Hanson *et al.* (2012) o cimento é responsável por cerca de 86% do consumo de energia na produção de concreto e entre 89% e 96% das emissões de  $\text{CO}_2$ .

O agregado é, de longe, o maior componente do concreto em peso. Constituinte cerca de 67% da massa total do concreto úmido (Hanson *et al.*, 2012). Assim como para as misturas asfálticas, os agregados representam uma fatia significativamente menor de emissões dentro do concreto de CP, com a DMT de transporte possuindo peso importante na emissão de CO<sub>2</sub>, visto que constituem mais da metade da massa do material final.

Analizando as emissões de uma solução em CCP no cenário chinês de pavimentação, Ma *et al.* (2016) demonstraram que 92,7%, das emissões totais do projeto estudado vieram da fase de produção de matéria-prima, enquanto apenas 7,3% vieram da fase de fabricação de concreto e da fase de construção do pavimento.

Teles *et al.* (2024), calculando emissões a partir do consumo discretizado em composições SICRO, apresentam valores de emissões de CO<sub>2</sub> de 973,89 tCO<sub>2</sub>/km, com a fase de produção dos materiais respondendo por 84% desse montante. Os autores também fizeram uso da ferramenta OpenLCA e calcularam um segundo valor de emissão de aproximadamente 63 tCO<sub>2</sub>/km por ano, em um projeto de vida útil de 20 anos, totalizando uma emissão final no valor de 1.260 tCO<sub>2</sub>/km construído.

### **1.5.3 Pavimento de Concreto de cimento Portland vs pavimento asfáltico**

Silva *et al.* (2014) concluíram que o asfalto apresenta um impacto ambiental significativamente menor em comparação com o pavimento de concreto. Os resultados mostraram que o asfalto foi 44% menos impactante em termos de desempenho ambiental. Segundo os autores, o principal fator para o desempenho inferior do pavimento de concreto está diretamente ligado às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) geradas na fabricação do cimento.

O potencial de aquecimento global de pavimentos rígidos, em termos construtivos, é de 1,9 a 3,1 vezes superior ao de pavimentos flexíveis, de acordo com Gatiganti (2024). Nessa mesma direção, Barry *et al.* (2024) demonstraram que as emissões em pavimentos de concreto são aproximadamente três vezes maiores do que os asfálticos.

Teles *et al.* (2024) compararam pavimentos asfálticos e de concreto, revelando diferenças significativas nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os autores calcularam os valores indicando que a solução asfáltica possui 10 anos de vida útil enquanto a solução em CCP foi dimensionada para 20 anos. Ao diluir as emissões totais por ano, encontraram que o pavimento de concreto apresentou uma contribuição 51% inferior à da solução asfáltica.

White *et al.* (2010) avaliaram o impacto da produção e construção de materiais para quatro tipos distintos de pavimentos no potencial de aquecimento global. Uma comparação direta revelou que as emissões de gases de efeito estufa do asfalto a quente foram aproximadamente 77,4% menores do que as do concreto de cimento Portland.

Já Zapata *et al.* (2005) avaliaram o consumo de energia de pavimentos asfálticos e de concreto continuamente armado. A pesquisa sugere que, para uma mesma vida útil, os pavimentos de concreto exigem um consumo de energia superior nas etapas de extração de matérias-primas, fabricação e instalação dos materiais.

Kucukvar e Tatari (2012) avaliaram o consumo de energia e emissões de GEE de A1 até A5. Os autores concluíram que o consumo de energia para o CCP é maior do que para misturas asfálticas, entretanto, indicam que o asfalto consome mais recursos não renováveis do que o CCP. Os autores concluem que a construção de pavimentos de CCP emite aproximadamente 2,6 vezes mais poluição atmosférica quando comparados a mesma solução que o pavimento asfáltico.

Brown (2009) examinou e comparou a pegada de carbono de pavimentos em CA e CCP aplicados em rodovias, vias secundárias e residenciais na província de Ontário, no Canadá. O autor dimensionou pavimentos para o ciclo de vida de 50 anos. Os resultados revelaram que as emissões de GEE para o pavimento asfáltico foram entre 75,2% e 78,0% inferiores às do pavimento de CCP, qualificando-os como a escolha mais sustentável entre os tipos de pavimento avaliados.

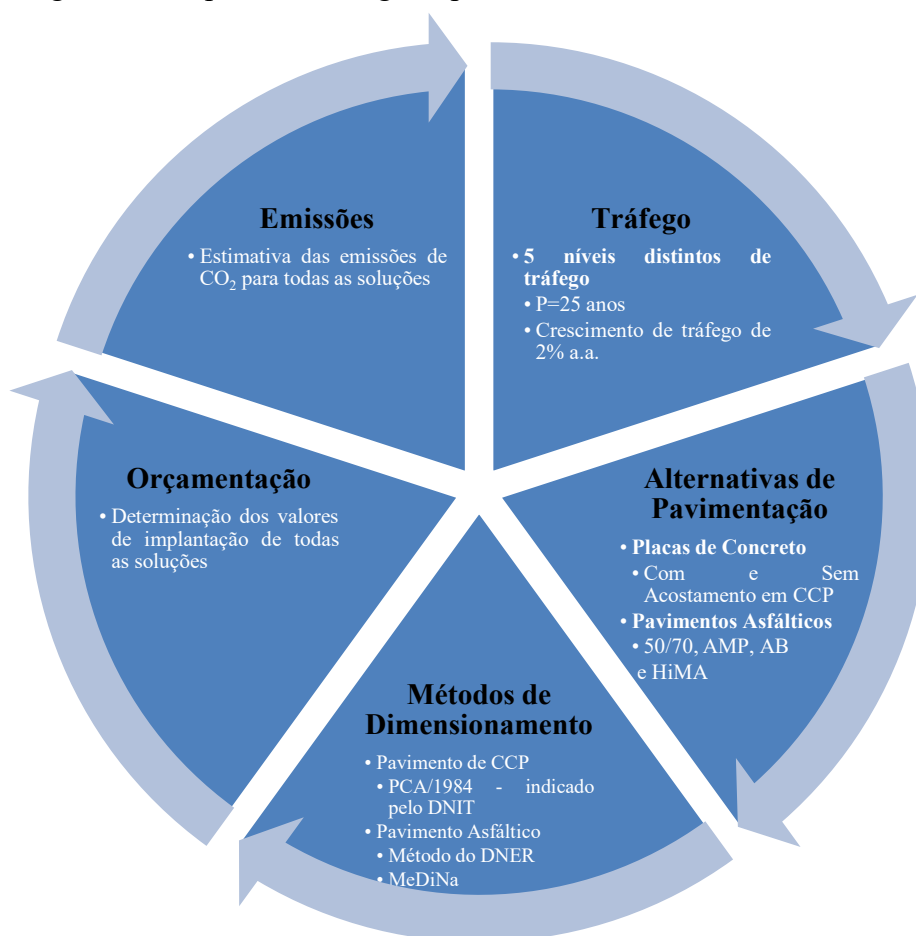
Thives e Ghisi (2017), em um estudo de revisão bibliográfica com um número substancial de citações acerca de emissões em pavimentos, concluíram, ao final, que os pavimentos asfálticos apresentam uma pegada de carbono inferior aos pavimentos rígidos. Embora a produção das matérias-primas e da mistura dos pavimentos flexíveis gere uma determinada quantidade de GEE, essa emissão é significativamente menor do que a associada à produção do CCP. A principal razão reside nas elevadas emissões de CO<sub>2</sub> durante os processos de fabricação do cimento.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de atender aos distintos objetivos deste estudo técnico-científico, definiu-se, inicialmente, a matriz de tráfego que seria empregada para o dimensionamento das soluções com diferentes alternativas em pavimentação. As premissas geotécnicas básicas e de materiais passíveis também foram estabelecidas para ambas as opções de pavimentação. Os dimensionamentos foram realizados com o emprego de métodos regulamentados no Brasil e indicados pelo DNIT. No que tange aos quesitos financeiros, a partir da definição de uma unidade federativa do país como referência, foram adotados parâmetros externos à concepção de estrutura idênticos, como, por exemplo, BDI, DMTs e data-base das composições de custo do SICRO.

As atividades desenvolvidas para a elaboração deste estudo abarcaram as diversas etapas, conforme esquematizada na Figura 5.

Figura 5 – Etapas metodológicas para o desenvolvimento do estudo



Fonte: Autores

## 2.1 Definições de Tráfego

O dimensionamento de pavimentos asfáltico, pelos métodos preconizados pelo DNIT e que foram empregados neste estudo, transformam a solicitação das distintas configurações de eixos e cargas em operações equivalentes do eixo-padrão através do emprego dos Fatores de Equivalência de Carga (FEC) do USACE ( $N_{USACE}$ ). Para o dimensionamento estrutural de pavimentos de CCP, o método da PCA (1984) avalia a contribuição individual de cada configuração de eixo e carga na degradação por fadiga e por erosão.

Dessa maneira, este estudo empregou como referência da matriz de tráfego o projeto do DNIT, *de maio de 2024, da rodovia BR-08/DF, do trecho Entr. BR-251(A)/DF-001/240(A) (Brasília) – Entr. DF-180(B) (Div. DF/GO), com extensão total de 40,3km<sup>16</sup>*.

Em síntese, este projeto assumiu as quantidades totais de eixos e cargas apresentadas na Tabela 7, integralmente trafegando na faixa mais carregada (faixa de projeto). Na mesma tabela, apresenta-se o cálculo do Fator de Veículo ( $FV_{USACE}$ ), com base na adoção dos  $FEC_{USACE}$ . Vale lembrar que o FV representa o potencial destrutivo médio dos veículos comerciais que trafegarão na rodovia, na faixa mais carregada, em um único sentido, durante o período de projeto (Balbo, 2007 e Manual de Estudos de Tráfego - IPR-723).

Tabela 7 – Determinação do  $FV_{USACE}$  com base no projeto da BR-080

Eixos	Carga (tf)	Quantidade de Eixos	Quantidade Total de Veículos Comerciais Considerada: 17.946.637		
			pi(%)	$FEC_{USACE}$	pi(%)x $FEC_{USACE}$
ESRD	10	11.610.722	64,696	3,289	212,815
	5	2.902.681	16,174	0,134	2,161
ETD	17	13.718.285	76,439	8,549	653,464
	6	3.429.571	19,110	0,080	1,531
ETT	25,5	2.656.522	14,802	9,300	137,659
	9	664.130	3,701	0,128	0,473
$\Sigma (pi(\%) \times FEC_{USACE})$					1.008,10
$FV_{USACE} =$					10,081

Fonte: Autores, com dados do projeto da BR-080/DF

No presente estudo, definiu-se o dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto e asfálticos, e as subsequentes comparações de custos de implantação e emissões de CO<sub>2</sub> para um

<sup>16</sup> Dados obtidos em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em março de 2025;

espectro de tráfego que compreendesse desde uma condição de tráfego leve até extremamente pesado, representados por  $N_{USACE}$  entre  $5 \times 10^6$  e  $5 \times 10^8$ .

O período de projeto que acumularia este tráfego foi estipulado em 25 anos, tanto para pavimentos de CA quanto de CCP, com uma expectativa de crescimento linear do tráfego de 2% a.a. Cabe salientar ainda que os distintos níveis de tráfego foram considerados solicitando, exclusivamente, uma única faixa de tráfego. Assim, para a condição de tráfego mais pesada,  $5 \times 10^8$ , por exemplo, o número de veículos comerciais que solicitariam uma única faixa seria muito superior à capacidade da via, provocando sua saturação (congestionamentos), inviabilizando que a via fosse integralmente solicitada pelo montante previsto de veículos no período de projeto assumido. Em outras palavras, a condição apontada está sendo empregada neste estudo apenas para uma condição fictícia de tráfego em que o pavimento desta faixa mais carregada seria solicitado por um caminhão a cada 20s (considerando uma distribuição uniforme dos veículos comerciais nas 24h do dia e sem solicitações de veículos de passeio).

Com base nos dados apresentados na Tabela 8, foi possível estimar a quantidade total de eixos que solicitariam a faixa mais carregada para cada nível de tráfego. As quantidades de eixos foram empregadas nos dimensionamentos das soluções em pavimentos de CCP, enquanto os N's foram empregados no dimensionamento dos pavimentos asfálticos, conforme determina cada método de projeto. Os N's que serão assumidos e o período de projeto estão alinhados aos últimos projetos de pavimentos asfálticos e de CCP apresentados no capítulo anterior.

Tabela 8 – Quantidades de eixos previstos para o período de projeto de 25 anos

Eixos	Carga (tf)	Quantidade de Eixos para cada nível de Tráfego				
		$N_{USACE}=5 \times 10^6$	$N_{USACE}=10^7$	$N_{USACE}=5 \times 10^7$	$N_{USACE}=10^8$	$N_{USACE}=5 \times 10^8$
<b>ESRD</b>	<b>5</b>	81.173	166.036	802.506	1.660.358	8.025.062
	<b>10</b>	324.692	664.143	3.210.024	6.641.429	32.100.241
<b>ETD</b>	<b>6</b>	95.907	196.174	948.176	1.961.743	9.481.758
	<b>17</b>	383.630	784.697	3.792.703	7.846.973	37.927.034
<b>ETT</b>	<b>9</b>	18.572	37.989	183.612	379.888	1.836.125
	<b>25,5</b>	74.289	151.955	734.450	1.519.553	7.344.504

Fonte: Autores

## 2.2 Definições das Condições Geotécnicas e de Materiais Empregados

Em termos de fundação para as distintas estruturas de pavimento, optou-se por definir o subleito com capacidade média de suporte, adotando-se um valor característico de ISC/CBR de 8%, compatível no MeDiNa a um Solo Siltoso NS'. Quanto aos demais materiais disponíveis para



emprego em camadas granulares, adotou-se o Macadame Seco – MS (sub-base de pavimentos asfálticos), Brita Graduada Simples – BGS (para bases de pavimentos asfálticos e sub-bases de pavimentos de concreto).

Para materiais cimentados das alternativas de pavimentos de CCP, adotou-se o concreto compactado com rolo (CCR). Este material cimentado também foi considerado em algumas simulações com pavimentos semirrígidos e semirrígidos invertidos. Já o CCP para as placas, conforme prática nacional corrente, inclusive presente nas últimas licitações e obras, foi assumido com a resistência à tração na flexão de 4,5 MPa, parâmetro único de influência no dimensionamento de pavimentos de CCP pelo Método da PCA (1984).

Quanto aos concretos asfálticos, com o intuito de explorar as alternativas disponíveis comercialmente e passíveis de emprego no MeDiNa, foram considerados quatro materiais distintos, em sua maioria, aplicados em obras rodoviárias nacionais, dosados com diferentes tipos de ligantes, a saber: CAP 50/70, Asfalto-Borracha, Asfalto Modificado por Polímero e HiMA (asfalto altamente modificado por polímero). Ressalta-se que estes materiais foram retirados de um banco de dados do GEPPASV, com comportamentos e desempenhos médios em seus grupos, e que foram amplamente caracterizados e analisados em dissertações de mestrado e teses de doutorado.

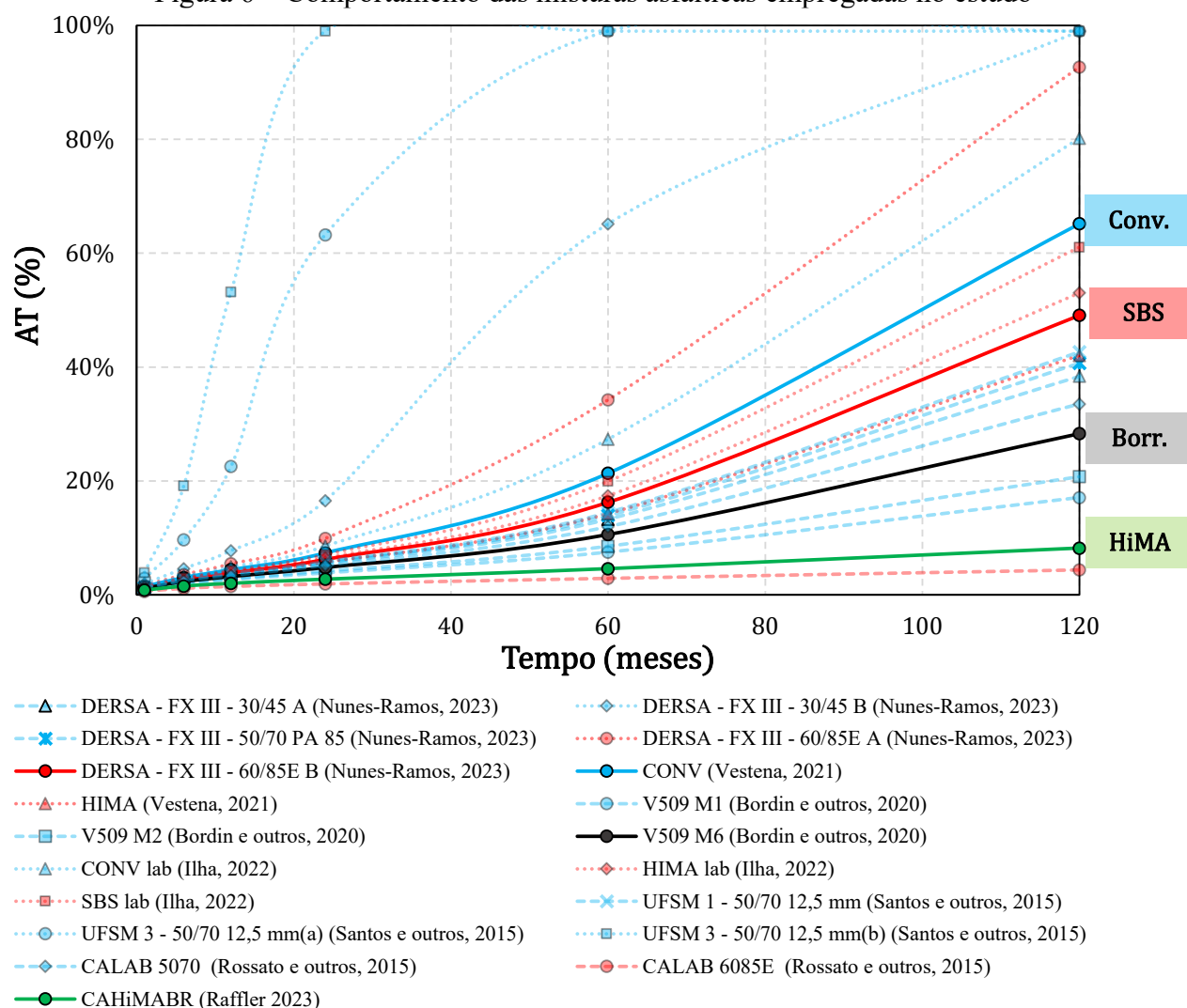
Os parâmetros essenciais dessas misturas estão apresentados na Tabela 9. A Figura 6 demonstra o comportamento dos concretos asfálticos escolhidos em relação a uma parte das misturas do banco de dados da UFSM.

Tabela 9 – Características das Misturas Asfálticas empregadas neste estudo

Mistura	Nome no Trabalho de Referência	Referência	Tipo de Agregado	Módulo de Resiliência (Mpa)	Curva de Fadiga		FFM	FN
					K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>		
<b>CAP 50/70</b>	CONV	Vestena (2021)	Granítico	6148	4,640E-12	-3,775	1,203	634
<b>AMP 60/85</b>	DERSA FXIII 60/85E B	Nunes-Ramos (2023)	Basáltico	2014	3,261E-09	-3,325	1,652	7200
<b>AB-08</b>	V509 M6	Bordin (2020)	Basáltico	6386	2,355E-14	-4,542	1,447	164
<b>HiMA</b>	CAHiMA	Raffler (2023)	Gnáissico	7628	3,780E-15	-4,817	1,550	-

Fonte: Autores

Figura 6 – Comportamento das misturas asfálticas empregadas no estudo



Fonte: Autores

Cabe lembrar que a Figura 6 refere-se a uma forma de ranqueamento que o GEPPASV faz com base no desempenho esperado das misturas ensaiadas em seu laboratório, tendo condições de tráfego, período de projeto e estrutura de pavimento sempre idênticas (inclusive a espessura da camada asfáltica) e não necessariamente iguais às projetadas neste trabalho. Ainda, para não poluir a visualização da imagem, foram plotadas apenas 19 misturas de um universo de aproximadamente 100 misturas cadastradas no banco de dados. Conforme já mencionado, o desempenho das misturas adotadas neste estudo não apresentou resultados *outliers*, isto é, apresentando comportamento dentro da média de cada conjunto.

## 2.3 Dimensionamento das estruturas

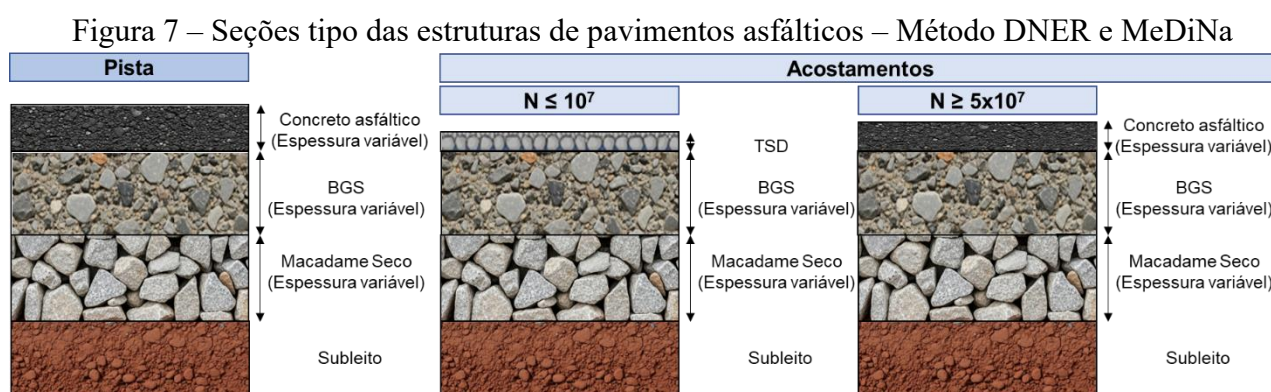
Como a proposta deste estudo é avaliar os custos de implantação de pavimentos asfálticos e de CCP, em igualdade de condições de tráfego e geotécnicas (solo de fundação), optou-se por efetuar o dimensionamento estrutural do pavimento pelos métodos vigentes atualmente e indicados pelo DNIT. Dessa forma, para pavimentos de CCP foi adotado o Método da PCA (1984) e, para pavimentos de CA, o Método do DNER e o MeDiNa foram empregados.

### 2.3.1 Pavimentos asfálticos

Conforme já explicitado, os pavimentos asfálticos foram dimensionados pelo Método do DNER e pelo MeDiNa. O primeiro, mais antigo, basicamente protege o pavimento contra a ruptura por cisalhamento do solo/materiais granulares, não fazendo menção quanto ao desempenho futuro do pavimento em relação aos outros mecanismos de ruptura, mas requer espessura mínima da camada asfáltica a ser empregada (em função do tráfego).

O segundo método (MeDiNa), por sua vez, visa estabelecer os níveis máximos de degradação da estrutura em relação à fadiga e ao ATR. Neste método, ainda é possível a predição de desempenho com o emprego de distintos tipos de misturas asfálticas (com diferentes ligantes asfálticos, por exemplo), diferentemente do que ocorre com o Método do DNER, em que as misturas asfálticas, com quaisquer tipos de ligantes, são consideradas apenas pela sua capacidade de atenuar os esforços verticais e cisalhantes oriundos do tráfego solicitante.

As seções tipo das estruturas dos pavimentos asfálticos, para a pista e acostamentos, encontram-se ilustradas na Figura 7.



Fonte: Autores

### 2.3.1.1 Dimensionamento de estruturas de Pavimentos asfálticos – Método do DNER

Para este método, o ponto de partida é o cálculo das espessuras, referenciada a material granular, necessária à proteção do subleito (com ISC ou CBR = 8%), do reforço do subleito (não adotado neste estudo) e da sub-base granular (Macadame Seco – MS, assumido neste projeto). Este cálculo é possibilitado pelo emprego de ábacos ou pela expressão demonstrada na sequência (Equação 3).

$$H_i = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad [3]$$

Onde:

$H_i$  = espessuras, referenciada ao material granular, necessária à proteção de um material contra a ruptura por cisalhamento;

$N$  = é o tráfego assumindo os  $FEC_{USACE}$

CBR = refere-se ao ISC do material a ser protegido, no caso do Subleito 8% e no caso do MS de 20% - valor máximo de referência para esta camada.

Na Tabela 10, as espessuras, referenciadas ao material granular, necessárias à proteção do Subleito ( $H_m$ ) e da Sub-base ( $H_{20}$ ), estão apresentadas para cada condição de tráfego avaliada neste estudo técnico-científico. Também estão dispostas as espessuras de concreto asfáltico, de base em BGS e sub-base em MS, resultantes do dimensionamento, observando os coeficientes de equivalência estruturais de cada um dos materiais, a saber, 2,0 para o concreto asfáltico; 1,0 para a base de BGS; e 0,77 para a sub-base em MS.

Tabela 10 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos pavimentos asfálticos – Método do DNER

$N_{USACE}$	$H_m$ (cm)	$H_{20}$ (cm)	$h_{CA}$ (cm)	$h_{BGS}$ (cm)	$h_{MS}$ (cm)	CBR <sub>subleito</sub> (%)
$5 \times 10^6$	47,11	27,24	6,0	20	20	8
$10^7$	48,71	28,16	7,5	19	20	8
$5 \times 10^7$	52,64	30,43	10,0	18	19	8
$10^8$	54,43	31,47	12,5	14	20	8
$5 \times 10^8$	58,82	34,00	12,5	20	18	8

Fonte: Autores

Como o Método do DNER não faz distinção entre tipos específicos de misturas asfálticas, assumiu-se, para fins de orçamentação, o CA com CAP 50/70, e as espessuras mínimas são aquelas tabeladas no método como mínimas para cada nível de tráfego. Ressalta-se que o dimensionamento ora apresentado se fundamenta na resolução das inequações características da metodologia a fim de observar o atendimento às espessuras mínimas de camadas, referenciadas ao material granular padrão,

necessárias à proteção, nestes casos, do subleito de CBR de 8% e do Macadame Seco. Em tempo, não há menção, no método, quanto à confiabilidade do dimensionamento.

### **2.3.1.2 Dimensionamento de estruturas de Pavimentos asfálticos – MeDiNa**

O MeDiNa, por tratar-se de um método mais recente e que permite análises adicionais àquelas do Método do DNER, demanda, também, maior nível de complexidade para a perfeita caracterização dos materiais a serem empregados no projeto.

Imaginando que as simulações seriam para as alternativas de pavimentação em vias de relevância na malha viária, para os dimensionamentos, indicou-se vias de um sistema arterial principal, com a confiabilidade no dimensionamento de 95% (a maior possível e que condiciona dimensionamentos de estruturas mais robustas), ATR máximo de 10 mm e %AT de 30% ao final do período do projeto (sempre de 25 anos – para o MeDiNa, a referência foi sempre o  $N_{USACE}$  acumulado ao final do período).

Para o subleito, assumiu-se no MeDiNa, o solo *Siltoso NS'* do banco de dados do sistema. Do mesmo banco de dados, para a sub-base em MS, empregou-se o material tipo *Gnaisse C4*, enquanto para a BGS de base, o *Gnaisse C5*. Os coeficientes de *Poisson* foram os mesmos indicados pelo método, isto é, 0,45 para o solo e 0,35 para os materiais granulares. Para os CAs, este parâmetro adotado foi de 0,30.

As propriedades de rigidez e de deformação permanente empregadas nas simulações também seguiram os mesmos parâmetros constantes do MeDiNa para os materiais de solo e granulares simulados. Quanto aos revestimentos asfálticos, as propriedades de rigidez e de dano à fadiga foram apresentadas anteriormente na Tabela 9, relativa aos materiais asfálticos passíveis de emprego. Na Tabela 11, está a síntese do dimensionamento realizado com o MeDiNa para as condições informadas.

Analisando o dimensionamento, percebe-se que as espessuras de camadas asfálticas para o menor  $N_{USACE}$  ( $5 \times 10^6$ ), para todos os materiais simulados, poderiam ser inferiores a 5 cm (que é o limite mínimo imposto pelo MeDiNa), uma vez que o %AT foi inferior ao limite máximo de 30%. Poder-se-ia, por exemplo, investigar a possibilidade de emprego de tratamento superficial duplo ou triplo. Para o tráfego imediatamente superior ( $10^7$ ), a opção de concreto asfáltico com HiMA (5,0cm) também está superdimensionada, com %AT de 19,5%. Em todos os casos (materiais asfálticos e tráfegos), o critério de falha crítico foi a fadiga, uma vez que o máximo afundamento em trilha de rodas encontrado foi de 7 mm.

Tabela 11 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos pavimentos asfálticos – MeDiNa

NUSACE	Desempenho do Pavimento		Revestimento		Base		Sub-base		Subleito
	%AT	ATR (mm)	Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	h <sub>BGS</sub> (cm)	Material	h <sub>MS</sub> (cm)	Material	Material
5x10 <sup>6</sup>	22,8%	7,0	50/70	5,0	12	Gnaisse C5	18	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
	18,0%	7,0	Polímero	5,0					
	15,1%	7,0	Borracha	5,0					
	10,2%	6,9	HiMA	5,0					
10 <sup>7</sup>	29,0%	5,3	50/70	10,0	12	Gnaisse C5	18	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
	27,3%	6,1	Polímero	7,5					
	27,5%	6,8	Borracha	6,5					
	19,5%	7,3	HiMA	5,0					
5x10 <sup>7</sup>	28,6%	3,8	50/70	15,5	15	Gnaisse C5	15	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
	24,6%	4,9	Polímero	11,5					
	25,2%	5,3	Borracha	11,0					
	25,2%	6,3	HiMA	8,5					
10 <sup>8</sup>	29,4%	3,3	50/70	18,0	15	Gnaisse C5	20	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
	26,3%	4,8	Polímero	13,0					
	28,3%	5,2	Borracha	12,5					
	25,0%	6,0	HiMA	10,0					
5x10 <sup>8</sup>	29,7%	2,5	50/70	24,5	15	Gnaisse C5	20	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
	29,2%	4,0	Polímero	17,0					
	28,8%	4,2	Borracha	17,0					
	29,8%	5,1	HiMA	13,5					

Fonte: Autores

Outro aspecto que fica evidente nos dados apresentados refere-se à influência da modificação dos ligantes asfálticos empregados nas misturas. A demanda por espessura de revestimento asfáltico, para CA's com CAP 50/70, sempre foi muito superior aos dos asfaltos modificados com borracha ou polímero. Para as misturas empregadas nas simulações, o asfalto modificado por polímero apresentou necessidade de espessuras semelhantes às do asfalto borracha. Os asfaltos altamente modificados por polímero (HiMA) apresentaram necessidade de menor robustez em termos de espessuras de revestimentos entre todos os concretos asfálticos avaliados.

### 2.3.2 Pavimentos de concreto

Os dimensionamentos estruturais das soluções em pavimentos de concreto (com juntas serradas, com barras de ligação e transferência) foram obtidos em conformidade ao preconizado pelo DNIT (Manual de Pavimentos Rígidos – IPR 714) que adota o Método da PCA (1984). Lembrando que a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) traduziu o referido método oriundo dos Estados Unidos no Estudo Técnico “ET-97 – Dimensionamento de Pavimento Rodoviários e Urbano de Concreto pelo Método da PCA/1984”.

As premissas básicas para o dimensionamento foram adotadas a partir de uma pesquisa bibliográfica realizada com os últimos projetos licitados no país. Dessa maneira, definiu-se pelo emprego de sub-bases granulares, sempre de espessura de 10cm em BGS, para promover uniformidade ao subleito e drenagem ao pavimento. A base empregada para todas soluções foi em CCR, também padronizada em 10 cm. As condições de carga e eixos solicitantes, conforme já explicitado neste trabalho, seguiram as condições descritas no Volume 03 - Memória Justificativa do Projeto<sup>17</sup>.

A resistência especificada para o concreto das placas foi de 4,5 MPa, referida à tração na flexão aos 28 dias. Da mesma forma com que as camadas constituintes do sistema de apoio às placas foram estabelecidas, isto é, com subleito com CBR = 8%, sub-base em BGS de 10cm e base em CCR de 10 cm, foi possível, a partir das tabelas e ábacos do método, assumir um módulo de reação do sistema de apoio de 142 MPa/m.

Como a pesquisa em projetos de pavimentos de CCP demonstrou o emprego, no passado, de muitas estruturas sem acostamento em concreto e, projetos mais atuais, com acostamento em concreto (inclusive com recente fala do DNIT justificando o emprego de acostamentos em concreto por conta de alguns problemas construtivos no passado), optou-se por realizar o dimensionamento para cada nível de tráfego, considerando as duas condições de acostamento. Vale lembrar que a presença de acostamentos em concreto reduz as tensões críticas de tração na flexão nas placas, possibilitando a redução de espessura das placas, impactando, portanto, o custo de implantação das soluções em CCP.

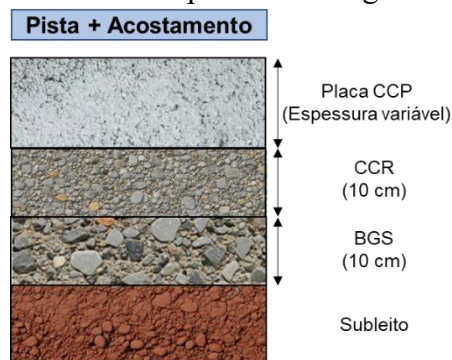
Ainda, em quase todos os projetos pesquisados, as análises estruturais do dimensionamento pela PCA (1984) consideraram os dois mecanismos de ruptura previstos no método, a saber: fadiga das placas de concreto (CRF) e ruptura por erosão (CRE) do pavimento.

As seções tipo das estruturas dos pavimentos de CCP, para a pista e acostamentos, encontram-se ilustradas nas Figura 8 e Figura 9. Na Tabela 12, está a síntese do dimensionamento realizado pelo Método da PCA (1984).

<sup>17</sup> Elaboração dos projetos básicos e executivos de engenharia para adequação de capacidade, duplicação, restauração, melhorias de segurança e eliminação de pontos críticos BR-080/DF - Entr. BR-251(A)/DF-001/240(A) (Brasília) – Entr. DF-180(B) (Div. DF/GO). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em março de 2025.

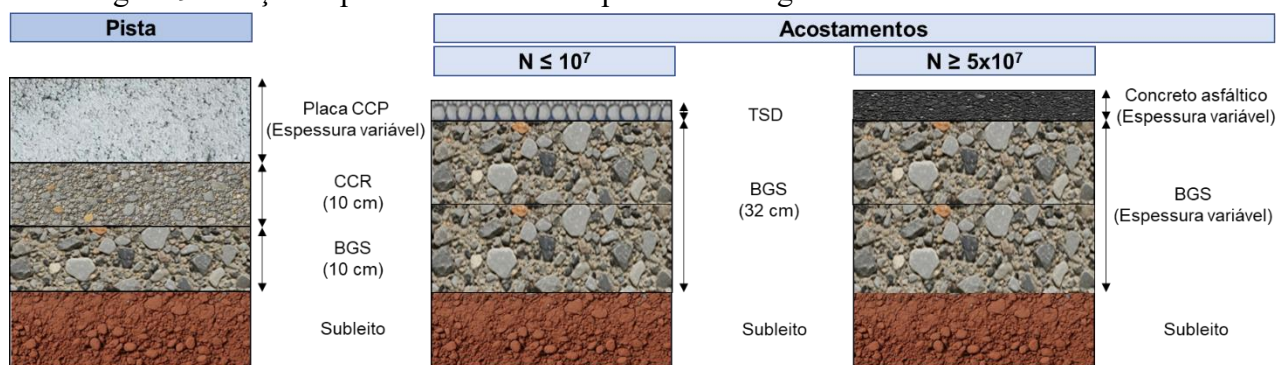


Figura 8 – Seção tipo das estruturas de pavimentos rígidos – com acostamento em CCP



Fonte: Autores

Figura 9 – Seções tipo das estruturas de pavimentos rígidos – com acostamento asfáltico



Fonte: Autores

Tabela 12 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos pavimentos de CCP – PCA (1984)

N <sub>USACE</sub>	Tipo de Acostamento	CRF <sup>1</sup> (%)	CRE <sup>2</sup> (%)	h <sub>CCP</sub> (cm)	h <sub>CCR</sub> (cm)	h <sub>BGS</sub> (cm)	CBR <sub>subleito</sub> (%)
5x10 <sup>6</sup>	CCP	0%	46%	16,0	10	10	8
	Flexível	27%	44%	19,0	10	10	8
10 <sup>7</sup>	CCP	0%	52%	17,0	10	10	8
	Flexível	55%	89%	19,0	10	10	8
5x10 <sup>7</sup>	CCP	0%	96%	18,0	10	10	8
	Flexível	0%	76%	23,0	10	10	8
10 <sup>8</sup>	CCP	0%	83%	19,0	10	10	8
	Flexível	0%	91%	24,0	10	10	8
5x10 <sup>8</sup>	CCP	0%	70%	21,0	10	10	8
	Flexível	0%	74%	27,0	10	10	8

Nota 1: Consumo de Resistência à Fadiga das placas de CCP; Nota 2: Consumo de Resistência à Erosão do Pavimento de CCP.

Fonte: Autores

Conforme esperado, para a mesma condição de tráfego, há substancial redução de espessura para a opção de pavimentos de CCP com acostamento em concreto. Ainda, para tráfegos crescentes, mais sensível é essa diferença.

O critério de falha por erosão foi predominante, em concordância aos inúmeros projetos pesquisados. Apesar da mecânica de pavimentos apontar para a necessidade de avaliar a degradação por fadiga da base cimentada (CCR), conforme indicado por Balbo (2009), o método da PCA (1984) não permite esta análise que poderia, eventualmente, incorrer em aumento de espessura da base cimentada ou de placa de CCP.

Assim como no Método do DNER para pavimentos asfálticos, o procedimento apontado pela PCA (1984) não permite considerar a confiabilidade no dimensionamento. Soma-se a tal incerteza, a inexistência de estudos que correlacione os aspectos vinculados aos esforços gerados na estrutura com a previsão de degradação real avaliada em campo em pistas experimentais, sobretudo no Brasil. O método empregado também não permite a avaliação da influência da dosagem do concreto (apenas considera a resistência à tração do CCP) sobre a predição de desempenho do pavimento rígido.

A influência sobre os esforços atuantes nas placas pelo efeito sobreposto do carregamento viário e do diferencial térmico nas placas também é negligenciado pelo método empregado, fato que pode incidir em subdimensionamento, segundo Balbo (2009).

Diante das incertezas apontadas anteriormente, é imperativo saudar a iniciativa do IPR/DNIT em fomentar pesquisas em pavimentos de CCP.

### **Juntas Transversais com Barras de Transferência**

Conforme o projeto do DNIT para a BR-080<sup>18</sup>:

[...] as juntas transversais com barras de transferência possuem dupla função, além de controlarem as fissuras de retração do concreto, transferem, para a placa seguinte, certa porcentagem da carga atuante em um dos lados da junta transversal, diminuindo a solicitação e o deslocamento vertical, consequentemente a formação de degrau.

O dimensionamento das BT pode ser realizado a partir do esforço cortante atuante nas juntas transversais. Contudo, para simplificar o processo, inúmeros projetos empregam a indicação da ABCP que sugere o dimensionamento destas barras em função da espessura da placa de concreto, conforme apresentado na Tabela 13. Este trabalho também empregou este processo simplificado.

<sup>18</sup> Projeto da obra: “Contratação de empresa especializada para execução das obras de adequação de capacidade, duplicação, restauração, melhorias de segurança e eliminação de pontos críticos, na rodovia BR-080/DF, entre o km 24,60 e o km 40,86”. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta em março de 2025.

Tabela 13 – Dimensões das barras de transferência para pavimento de concreto simples

Espessura da placa (cm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (cm)	Espaçamento (cm)
Até 17	20	46	30
17,5 - 22,0	25	46	30
22,5 - 30,0	32	46	30
> 30,0	40	46	30

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

As barras de transferência das juntas transversais de retração e de expansão deverão ser de aço CA-25, lisas. Ressalta-se que as BT deverão ter uma das metades pintada e/ou engraxada, de forma a serem protegidas à oxidação e à aderência com o concreto em um dos lados da junta, permitindo a livre movimentação da junta quando da contração ou expansão da placa.

As BT foram consideradas apoiadas em espaçadores treliçados de aço tipo CA-60, com um espaçamento de 5 metros para as juntas.

### Juntas Longitudinais com Barras de Ligação

De acordo com o projeto do DNIT para a BR-080:

[...] as juntas longitudinais são empregadas para o controle das fissuras longitudinais causadas pelo empenamento das placas de concreto produzidas pelas diferenças de temperatura e de umidade entre as faces superior e inferior, além de restringir possíveis movimentos laterais e assegurar que, unidas, possibilitem a transferência de carga pela entrosagem dos agregados ou pelo encaixe tipo macho-fêmea.

Contudo, cabe salientar que estas BL não conferem, na prática, controle algum em relação ao empenamento térmico, conforme amplamente discorrido por diferentes referências encontradas em Balbo (2009).

O dispositivo de ligação é calculado para resistir à força de atrito entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima desta. O comprimento de uma barra de ligação, para assegurar a necessária aderência ao concreto, é calculado conforme a Equação 4:

$$l = \frac{1}{2} \times \frac{S \times d}{\tau_b} + 7,5 \quad [4]$$

Onde:

$l$  = comprimento de uma barra de ligação, em cm;

$S$  = tensão admissível no aço, tomado igual a 2/3 da tensão de escoamento, em MPa;

$d$  = diâmetro da barra de ligação, em cm;

$\tau_b$  = tensão de aderência entre o aço e o concreto, tomado igual a 2,45MPa;

7,5 = margem de segurança, prevendo-se uma possível descentralização da barra, em cm.

As BL utilizadas neste tipo de junta são determinadas pela área de aço necessária para resistir estas forças de atrito presentes nas juntas longitudinais. O cálculo da área de aço é realizado pela fórmula sugerida pela ABCP (Equação 5):

$$A_s = \frac{b \times f \times \gamma_c \times h}{100 \times S} \quad [5]$$

Onde:

$A_s$  = área de aço necessária por metro de comprimento da junta longitudinal (cm<sup>2</sup>/m);

$b$  = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima (m);

$f$  = coeficiente de resistência entre a placa e o subleito ou sub-base, geralmente utilizado igual a 1,5;

$\gamma_c$  = peso específico do concreto (Adotado 24.000 N/m<sup>3</sup>);

$h$  = espessura de placa (m);

$S$  = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento, igual a 333 MPa.

Tabela 14 apresenta as características das BL calculadas.

Tabela 14 – Características das barras de ligação – aço CA-50

Espessura placa (cm)	Diâmetro adotado (mm)	Comprimento (cm)
16-19	10,00	75
21-27	12,50	95

Fonte: Autores

### 2.3.3 Dimensionamento Estrutura dos Acostamentos e sua compatibilização com a estrutura das faixas de rolagem

Para a realização das comparações de custos de implantação e de emissões de CO<sub>2</sub> das distintas alternativas de pavimentação propostas neste estudo será necessário compor os quantitativos da plataforma integral do pavimento. Dessa forma, tornou-se necessário dimensionar a estrutura dos acostamentos (exceção feita para a condição de pavimentos de CCP com acostamento em concreto).

Para tanto, assumiu-se, para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos dos acostamentos, o tráfego de 10% daquele previsto na faixa de rolagem. Assim, por exemplo, quando o tráfego da faixa de rolagem era de  $5 \times 10^7$ , para o acostamento foi considerado o tráfego de  $5 \times 10^6$ .

Empregou-se o Método do DNER para os acostamentos dos pavimentos asfálticos dimensionados pelo mesmo método. Para as estruturas de acostamento em que foram empregadas o método do MeDiNa na pista de rolagem, ou para o caso de pavimentos de CCP sem acostamentos em concreto, optou-se pela manutenção do MeDiNa para a definição da estrutura destes locais. Os mesmos materiais passíveis de emprego e previamente caracterizados foram mantidos como alternativas para o acostamento. Cabe indicar que para os tráfegos (na faixa de rolagem) de  $5 \times 10^6$  e  $10^7$ , optou-se pelo emprego de TSD (Tratamento Superficial Duplo) nos acostamentos, uma vez que o dimensionamento realizado previamente para a pista com o tráfego mais baixo ( $5 \times 10^6$ ) já havia indicado espessura de revestimento igual à mínima, no MeDiNa, e com AT% bem inferior aos 30%.

Na Tabela 15 e na Tabela 16, estão as sínteses dos dimensionamentos realizados para os acostamentos, tanto pelo Método do DNER quanto pelo MeDiNa.

Tabela 15 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos acostamentos – Método do DNER

NUSACE Acostamento	NUSACE Fx. Rolamento	$h_{CA}$ (cm)	$h_{BGS}$ (cm)	$h_{MS}$ (cm)	CBR <sub>subleito</sub> (%)
$5 \times 10^5$	$5 \times 10^6$	TSD (2cm)	20	20	8
$10^6$	$10^7$	TSD (2cm)	20	20	8
$5 \times 10^6$	$5 \times 10^7$	6,0	20	20	8
$10^7$	$10^8$	7,5	19	20	8
$5 \times 10^7$	$5 \times 10^8$	10	18	19	8

Fonte: Autores

Tabela 16 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos acostamentos – MeDiNa

(continua)

NUSACE Acostamento	NUSACE Fx. Rolamento	Desempenho do Pavimento		Revestimento		Base		Sub-base		Subleito
		%AT	ATR (mm)	Tipo de Ligante	$h_{CA}$ (cm)	$h_{BGS}$ (cm)	Material	$h_{MS}$ (cm)	Material	Material
$5 \times 10^5$	$5 \times 10^6$	---	5,7	TSD	2,0	12	Gnaisse C5	18	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
		---	5,7	TSD	2,0					
		---	5,7	TSD	2,0					
		---	5,7	TSD	2,0					
$10^6$	$10^7$	---	6,0	TSD	2,0	12	Gnaisse C5	18	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
		---	6,0	TSD	2,0					
		---	6,0	TSD	2,0					
		---	6,0	TSD	2,0					
$5 \times 10^6$	$5 \times 10^7$	22,8%	7,0	50/70	5,0	15	Gnaisse C5	15	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
		18,0%	7,0	Polímero	5,0					
		15,1%	7,0	Borracha	5,0					
		10,2%	6,9	HiMA	5,0					
$10^7$	$10^8$	29,0%	5,3	50/70	9,7	15	Gnaisse C5	20	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
		29,0%	6,3	Polímero	7,2					
		28,4%	6,9	Borracha	6,3					
		19,5%	7,3	HiMA	5,0					

NUSACE Acostamento	NUSACE Fx. Rolamento	Desempenho do Pavimento		Revestimento		Base		Sub-base		Subleito
		%AT	ATR (mm)	Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	h <sub>BGS</sub> (cm)	Material	h <sub>MS</sub> (cm)	Material	Material
5x10 <sup>7</sup>	5x10 <sup>8</sup>	28,6%	3,8	50/70	15,3	15	Gnaisse C5	20	Gnaisse C4	Solo Siltoso NS'
		29,0%	5,0	Polímero	11,2					
		29,2%	5,4	Borracha	10,7					
		28,3%	6,4	HiMA	8,3					

Fonte: Autores

Em tempo, como em todo o projeto, para promover a continuidade estrutural entre pista e acostamento e adequada condição de drenagem, alguns pequenos ajustes foram realizados a fim de permitir a concordância entre ambas as estruturas. O degrau máximo assumido neste estudo entre a pista e o acostamento foi de 5 cm.

## 2.4 Análise orçamentária

Nas análises orçamentárias, foram considerados os serviços relacionados às estruturas dos pavimentos, além da sinalização horizontal<sup>19</sup>, adotando-se como base o SICRO, para o estado do Paraná (conforme definição dos contratantes), sendo a data-base de janeiro de 2025 (última atualização disponível no início deste estudo), sem desoneração da folha de pagamento.

Os orçamentos foram elaborados para todas as estruturas dimensionadas, considerando os preços para a construção de 1 km de extensão, 2 faixas de rolamento com 3,60 m de largura cada, e acostamentos com 2,5 m, sendo uma rodovia de pista simples.

### 2.4.1 Composições de custo – critérios adotados

Para o cálculo dos custos diretos de construção das estruturas de pavimento dimensionadas, foram adotadas as composições de custo dos serviços relacionadas na Tabela 17. As composições de custo auxiliares, relacionadas aos serviços, são apresentadas na Tabela 18. Foram empregadas composições de custo que consideram areia e brita comerciais.

<sup>19</sup> Considerando a largura da faixa igual a 15cm; e 10 cm para a faixa de contraste no pavimento em concreto de cimento Portland.

Tabela 17 – Relação de composições de custo principais consideradas no estudo

Código	Fonte	Descrição	Unidade
4011279	SICRO	Base ou sub-base de macadame seco com brita comercial	m <sup>3</sup>
4011276	SICRO	Base ou sub-base de brita graduada simples	m <sup>3</sup>
4011214	SICRO	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m <sup>3</sup>
4011214A	SICRO Ajustado	Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m <sup>3</sup>
4011352	SICRO	Imprimação com emulsão asfáltica	m <sup>2</sup>
4011353	SICRO	Pintura de ligação	m <sup>2</sup>
4011536	SICRO	Membrana plástica isolante e impermeabilizante com espessura de 0,2 mm - fornecimento e instalação	m <sup>2</sup>
4011533A	SICRO ajustada	Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m <sup>3</sup>
407818A	Própria	Fornecimento e colocação de aço CA-25 para barra de transferência	Kg
407819A	Própria	Fornecimento e colocação de aço CA-50 para barra de ligação	Kg
407820A	Própria	Fornecimento e colocação de aço CA-60 - apoio barras de transferência	Kg
4011537	SICRO	Serragem de juntas em pavimento de concreto, limpeza e enchimento com selante a frio	m
4011372	SICRO	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita comercial	m <sup>2</sup>
4011463A	SICRO ajustada	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t
4011466A	SICRO ajustada	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t
4011471A	SICRO ajustada	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	t
4011466AH	SICRO ajustada	Concreto asfáltico com asfalto polímero HiMA - faixa C - areia e brita comerciais	t
5213408	SICRO	Pintura de faixa com termoplástico por aspersão - espessura de 1,5 mm	m <sup>2</sup>
5213410	SICRO	Pintura de faixa com termoplástico em alto relevo tipo I por extrusão - relevo duplo com base	m <sup>2</sup>
ASF-001	Própria (Base preços ANP)	Aquisição materiais asfálticos	t
ASF-002	Própria (Padrão SICRO)	Transporte materiais asfálticos	t

Fonte: Autores

Tabela 18 – Relação de composições de custo auxiliares consideradas no estudo

(continua)

Código	Fonte	Descrição	Unidade
6416040	SICRO	Usinagem de brita graduada com brita comercial em usina de 300 t/h	m <sup>3</sup>
6416092	SICRO	Usinagem para sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m <sup>3</sup>
6416092A	SICRO ajustada	Usinagem para sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial	m <sup>3</sup>
6416090A	SICRO ajustada	Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais	m <sup>3</sup>
6416078A	SICRO ajustada	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais	t
6416248A	SICRO ajustada	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t
6416213A	SICRO ajustada	Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	t
6416248AH	SICRO ajustada	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais	t
5914363	SICRO	Carga, manobra e descarga de cimento ou cal hidratada a granel em caminhão silo de 30 m <sup>3</sup>	t
5914647	SICRO	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga com carregadeira de 3,40 m <sup>3</sup> (exclusa) e descarga livre	t
5914648	SICRO	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga com carregadeira de 3,40 m <sup>3</sup> (exclusa) e descarga em distribuidor rebocável	t



Código	Fonte	Descrição	Unidade
5914651	SICRO	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga com carregadeira de 3,40 m <sup>3</sup> (exclusa) e descarga em distribuidor autopropelido	t
5914652	SICRO	Carga, manobra e descarga de agregados ou solos em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga em usina de solos de 300 t/h e descarga em distribuidor autopropelido	t
5914646	SICRO	Carga, manobra e descarga de concreto asfáltico com borracha em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga em usina de asfalto 100/140 t/h e descarga em vibroacabadora	t
5914649	SICRO	Carga, manobra e descarga de mistura betuminosa a quente em caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - carga em usina de asfalto 100/140 t/h e descarga em vibroacabadora	t
5914655	SICRO	Carga, manobra e descarga de materiais diversos em caminhão carroceria de 15 t - carga e descarga manuais	t
5919540	SICRO	Carga, manobra e descarga de concreto de cimento em caminhão basculante de 7 m <sup>3</sup> - carga em central de concreto de 150 m <sup>3</sup> /h e descarga em vibroacabadora	t
5914359	SICRO	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm
5914374	SICRO	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em revestimento primário	tkm
5914389	SICRO	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia pavimentada	tkm
5914315	SICRO	Transporte de concreto com caminhão basculante de 7 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm
5914330	SICRO	Transporte de concreto com caminhão basculante de 7 m <sup>3</sup> - rodovia em revestimento primário	tkm
5914345	SICRO	Transporte de concreto com caminhão basculante de 7 m <sup>3</sup> - rodovia pavimentada	tkm
5914449	SICRO	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia em leito natural	tkm
5914464	SICRO	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia em revestimento primário	tkm
5914479	SICRO	Transporte com caminhão carroceria de 15 t - rodovia pavimentada	tkm
5914364	SICRO	Transporte de cimento ou cal hidratada a granel com caminhão silo de 30 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm
5914365	SICRO	Transporte de cimento ou cal hidratada a granel com caminhão silo de 30 m <sup>3</sup> - rodovia em revestimento primário	tkm
5914366	SICRO	Transporte de cimento ou cal hidratada a granel com caminhão silo de 30 m <sup>3</sup> - rodovia pavimentada	tkm

Fonte: Autores

Buscando uma estimativa dos orçamentos que melhor represente a prática adotada no país, foi realizada uma análise dos consumos de insumos e das produções das composições para os serviços relacionados ao pavimento de CCP e pavimentos de CA. Dessa forma, são apresentados, a seguir, os dados para os serviços mais representativos - os quais contemplam o uso de CCP e ligantes de CA - considerando dados de sistemas de custos, estudos técnicos, licitações recentes e informações de obras públicas.

### ***Sub-base de concreto compactado com rolo (CCR)***

Na Tabela 19, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de Sub-base de CCR.

Tabela 19 – Relação de referências consultadas para o serviço de Sub-base de concreto compactado com rolo (CCR)

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011214 - Sub-base de concreto compactado com rolo - brita comercial 6416092 - Usinagem para sub-base de CCR - brita comercial
DER/PR <sup>20</sup>	03/2025	Sistema de custos	502605 - Concreto compactado a rolo Fck= 5Mpa 500501 - Usinagem de Concreto Fck = 5 MPa com cimento a granel
SETOP/MG <sup>21</sup>	01/2025	Sistema de custos	RO-00486 - Pavimento de concreto usinado em central de concreto de 150 t/h e compactado com rolo brita comercial RO-01072 - Usinagem em central de concreto de 150 m3/h para pavimento de concreto compactado com rolo brita comercial
DNIT BR-080/DF	01/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DNIT
DNIT BR-424-316 / AL	01/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DNIT
DER/PR PR-170 / PRC-466	04/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DER/PR
DNIT BR 285/SC	2019	Obra	Traço do concreto utilizado nas obras de implantação e Pavimentação da Rodovia BR-285
Ferreira <i>et al.</i> (2022)	2022	Artigo	Análise do desempenho do traço de concreto compactado com rolo (CCR), aplicado no sistema bus rapid transit (BRT) de Belém-PA, estudo de caso
Trichês (1993)	1993	Tese de Doutorado	Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento

Nota 1: Os dados de licitações foram obtidos nas páginas da internet do DNIT<sup>22</sup> e DER/PR<sup>23</sup>;

Nota 2: O traço de concreto utilizado na obra da BR-285 foi obtido por meio de solicitação junto ao DNIT, pelo sistema de acesso à informação do órgão rodoviário.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para o serviço em tela, são apresentados na Tabela 20 os consumos de CP indicados nas diferentes referências consultadas; e na Tabela 21, as produções horárias das equipes.

Tabela 20 – Consumos de cimento Portland considerando diferentes referências - Sub-base de concreto compactado com rolo (CCR)

Fonte	Origem	Cimento Portland (Kg/m³)
SICRO	Sistema de custos	100
DER/PR	Sistema de custos	120
SETOP/MG	Sistema de custos	200
DNIT BR-080/DF	Licitação	100
DNIT BR-424-316 / AL	Licitação	100
DER/PR PR-170 / PRC-466	Licitação	120
DNIT BR 285/SC	Obra	120 <sup>1</sup>
Ferreira <i>et al.</i> (2022)	Artigo	120
Trichês (1993)	Tese de Doutorado	120 e 200

Nota 1: O traço indica a utilização de 81 kg de cimento e 39 kg de filler cimentício.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

<sup>20</sup> Sistema de Custos do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR);

<sup>21</sup> Sistema de Custos do estado de Minas Gerais;

<sup>22</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>23</sup> Disponível em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta realizada em maio de 2025.

Tabela 21 – Produções das equipes considerando diferentes referências - Sub-base de concreto compactado com rolo (CCR)

Fonte	Origem	Produção horária da equipe (m³)
SICRO	Sistema de custos	124,50
DER/PR	Sistema de custos	130,00
SETOP/MG	Sistema de custos	124,50
DNIT BR-080/DF	Licitação	124,50
DNIT BR-424-316 / AL	Licitação	124,50
DER/PR PR-170 / PRC-466	Licitação	130,00

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Conforme pode-se observar na Tabela 20, são indicados diferentes consumos de CP para a execução de sub-base de concreto compactado com rolo, com valores variando de 100 a 200 kg/m³ e média de 130 kg/m³. O consumo de cimento efetivamente utilizado irá depender dos materiais utilizados, e será conhecido somente com a devida dosagem, sendo, então, estimado na fase orçamentária. Com base nos dados levantados, entende-se razoável admitir um consumo de cimento para o CCR de 120 kg/m³ para fins de orçamento, valor de traços reais e próximo à média levantada.

As produções das equipes consideradas nos sistemas de custos e licitações recentes apresentam valores semelhantes, variando de 124,5 a 130,0 m³/hora. Considerando os dados levantados (Tabela 21), com pequenas variações e sem impacto significativo nos custos, entende-se razoável utilizar o parâmetro do SICRO nas análises orçamentárias englobando o CCR (produção horária de 124,5 m³).

### ***Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes***

Na Tabela 22, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.

Tabela 22 – Relação de referências consultadas para o serviço de Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.

(continua)

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
SICRO 2	11/2016	Sistema de custos	2 S 02 606 00 - Concreto de cimento portland com fôrma deslizante 1 A 01 656 00 - Usinagem p/ conc. de cim. portland c/ forma deslizantes
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011533 - Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais 6416090 - Usinagem para pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais
DER/PR	03/2025	Sistema de custos	502645 - Pavimento de concreto de cimento Portland Fctmk = 4,5 MPa executado com pavimentadora 500045 - Usinagem de Concreto Fctmk – 4,50 MPa com cimento a granel

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
DER/SP <sup>24</sup>	01/2025	Sistema de custos	23.11.04.01 - Pavimento de concreto – aplicação com formas deslizantes
SETOP/MG	01/2025	Sistema de custos	RO-00482 - Pavimento de concreto usinado em central de concreto de 150 t/h e aplicado com fôrmas deslizantes areia e brita comerciais RO-01070 - Usinagem em central de concreto de 150 m³/h para pavimento de concreto com formas deslizantes areia e brita comerciais
DNIT BR-080/DF	01/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DNIT
DNIT BR-424-316 / AL	01/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DNIT
DER/PR PR-170 / PRC-466	04/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DER/PR
SIE/SC SC-160	06/2022	Licitação	Orçamento considerado na licitação da SIE/SC (Whitetopping)
DNIT BR 285/SC	2019	Obra	Traço do concreto utilizado nas obras de implantação e Pavimentação da Rodovia BR-285
DER/PR PR 180	2024	Obra	Traço do concreto utilizado nas obras de revitalização da PR-180 (Whitetopping)
DER/PR PRC - 280	2024	Obra	Traço do concreto utilizado nas obras de revitalização da PRC-280 (Whitetopping)

Nota 1: Os dados de licitações foram obtidos nas páginas da internet do DNIT<sup>25</sup>, DER/PR<sup>26</sup> e SIE/SC<sup>27</sup>

Nota 2: Os dados dos traços de concreto utilizados nas obras foram obtidos por meio de solicitações junto aos órgãos rodoviários, por meio dos sistemas de acesso à informação.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para o serviço em questão, são apresentados na Tabela 23 os consumos de cimento indicados nas diferentes referências consultadas; e na Tabela 24 as produções horárias das equipes.

**Tabela 23 – Consumos de cimento Portland considerando diferentes referências - Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.**

Fonte	Origem	Cimento Portland (Kg/m³)
SICRO2	Sistema de custos	380
SICRO	Sistema de custos	350
DER/PR	Sistema de custos	355
DER/SP	Sistema de custos	380
SETOP/MG	Sistema de custos	350
DNIT BR-080/DF	Licitação	350
DNIT BR-424-316 / AL	Licitação	350
DER/PR PR-170 / PRC-466	Licitação	355
SIE/SC SC-160	Licitação	400
DNIT BR 285/SC	Obra	400
DER/PR PR 180	Obra	367
DER/PR PRC - 280	Obra	411

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

<sup>24</sup> Sistema de Custos do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP);

<sup>25</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>26</sup> Disponível em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta realizada em maio de 2025.

<sup>27</sup> Disponível em: <https://www.portaldecompras.sc.gov.br/#/> - consulta realizada em maio de 2025.

Tabela 24 – Produções das equipes considerando diferentes referências - Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.

Fonte	Origem	Produção horária da equipe (m³)
SICRO2	Sistema de custos	149,00
SICRO	Sistema de custos	124,50
DER/PR	Sistema de custos	120,00
SETOP/MG	Sistema de custos	124,50
DNIT BR-080/DF	Licitação	124,50
DNIT BR-424-316 / AL	Licitação	124,50
DER/PR PR-170 / PRC-466	Licitação	120,00
SIE/SC SC-160	Licitação	124,50

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Conforme pode-se observar na Tabela 23, são considerados diferentes consumos de CP para o serviço de execução do Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes, com valores variando de 350 a 411 kg/m³. Assim como para o CCR, o consumo de cimento efetivamente utilizado nas placas de concreto irá depender dos materiais utilizados, e será conhecido somente com a dosagem, sendo, então, estimado na fase orçamentária. Os sistemas de custos utilizam valores entre 350 e 380 kg/m³; enquanto em licitações recentes observam-se ajustes desses consumos, com valores entre 350 e 400 kg/m³. Já os traços utilizados em três diferentes obras públicas (duas no estado do Paraná e uma no estado de Santa Catarina) apresentam consumos entre 367 e 411 kg/m³, com média de 392,7 kg/m³. Diante disso, considerando que o presente estudo avalia os custos na região Sul do Brasil, entende-se razoável admitir o consumo médio utilizado em obras públicas na região (392,7 kg/m³) para o CCP.

As produções das equipes consideradas nos sistemas de custos e licitações recentes apresentam valores variando entre 120,0 e 149,00 m³/hora (Tabela 24). O valor mais alto (149) era adotado na versão anterior do SICRO (versão 2), que foi substituída pela atualização do sistema de custos do DNIT, quando se passou a considerar uma produção horária de 124,5 m³/hora, muito similar aos valores adotados por outros sistemas de custos.

A produção da equipe mecânica do SICRO para o serviço é demonstrada na Figura 10. Ainda, o sistema de custos do DNIT considera uma vibroacabadora de formas deslizantes conforme as características da Figura 11.

Figura 10 – Produção da equipe mecânica – SICRO - Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO								
PRODUÇÃO DE EQUIPE MECÂNICA								
CÓDIGO:		SERVIÇO:				PRODUÇÃO DA EQUIPE:	UNIDADE:	
4011533		Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - areia e brita comerciais				124,50	m³	
VARIÁVEIS INTERVENIENTES		UNIDADE	EQUIPAMENTOS					
			E9017	E9589	E9588	E9044		
			Escavadeira hidráulica sobre esteira com capacidade de 0,4 m³ - 64 kW	Máquina texturizadora e aplicadora de cura química em pavimento de concreto - 44,80 kW	Vibroacabado ra de concreto sobre esteiras com fôrmas deslizantes - 205 kW	Central de concreto com capacidade de 150 m³/h - dosadora e misturadora		
a	Capacidade							
b	Consumo							
c	Distância							
d	Espessura	m		0,20	0,20			
e	Fator de carga							
f	Fator de conversão							
g	Fator de eficiência			0,83	0,83			
h	Largura de operação							
i	Largura de superposição							
j	Largura útil	m		7,20	7,20			
k	Quantidade de passadas							
l	Tempo de ida							
m	Tempo de retorno							
n	Tempo fixo							
o	Tempo total de ciclo							
p	Velocidade de ida	m/min		2,40	1,74			
q	Velocidade de retorno							
OBSERVAÇÕES			FÓRMULAS					
Produção horária estabelecida por meio do emprego do método teórico. Equipamento líder: E9044 - Central de concreto com capacidade de 150 m³/h - dosadora e misturadora				$P=60.g.d.i.p$	$P=60.g.d.i.p$			
PRODUÇÃO HORÁRIA				172,11	124,78	124,50		
NÚMERO DE UNIDADES			1,00	1,00	1,00	1,00		
UTILIZAÇÃO OPERATIVA			1,00	0,72	1,00	1,00		
UTILIZAÇÃO IMPRODUTIVA			0,00	0,28	0,00	0,00		
PRODUÇÃO DA EQUIPE			124,50					

Fonte: SICRO

Figura 11 – Vibroacabadora de concreto considerada no SICRO - Pavimento de concreto com fôrmas deslizantes.

<b>E9588 - Vibroacabadora de concreto com formas deslizantes - 205 kW</b>	
<b>Finalidade:</b> Aplicação, nivelamento e pré-compactação de concreto asfáltico em obras de pavimentação	
<b>Dados:</b>	
▪ Capacidade (m): 3,66 - 5,64	▪ Valor Residual (%): 30,00
▪ Largura (m): 5,63	▪ Coeficiente de Manutenção (K): 0,90
▪ Comprimento (m): 5,79	▪ Coeficiente de Combustível (l/kWh): 0,18
▪ Altura (m): 3,08	▪ Tipo de Combustível: Diesel
▪ Peso (kg): 20.866,00	▪ Seguro (%): -
▪ Vida Útil (anos): 7,00	▪ IPVA (%): -
▪ HTA (h/ano): 2.000,00	▪ Operação:
▪ Potência (kW): 205,00	- 1 Operador de equipamento especial
<b>Referência:</b> GP-2600 - 2 vias - Gomaco	

Fonte: SICRO

Importante frisar que a real produção de campo pode variar significativamente, a depender dos equipamentos utilizados e das condições de trabalho. Atualmente, existe uma ampla gama de equipamentos e marcas disponíveis no mercado, com diferentes configurações e capacidades produtivas. Todavia, há informação limitada dos custos desses equipamentos e medidas de produtividade em campo, dificultando uma análise mais detalhada. No entanto, é importante destacar que, considerando a composição do SICRO, os custos com equipamentos e pessoal (os quais tem relação com a produção da equipe) representam parcela pequena nos custos finais do serviço. Para o serviço em tela, de acordo com as composições do SICRO, os itens mais relevantes são os consumos de materiais e seus transportes.

Diante disso, considerando os dados levantados, com pequenas variações e sem impacto significativo nos custos, entende-se razoável utilizar o parâmetro do SICRO nas análises orçamentárias (pavimento de concreto com fôrmas deslizantes - produção horária de 124,5 m³).

### ***Concreto asfáltico com CAP 50/70***

Na Tabela 25, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de revestimento com concreto asfáltico utilizando CAP 50/70.



Tabela 25 – Relação de referências consultadas para o serviço de revestimento com concreto asfáltico utilizando CAP 50/70.

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011459 - Concreto asfáltico - faixa B-19 - areia e brita comerciais 6416143 - Usinagem de concreto asfáltico - faixa B-19 - areia e brita comerciais
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011463 - Concreto asfáltico - faixa C-12,5 - areia e brita comerciais 6416078 - Usinagem de concreto asfáltico - faixa C-12,5 - areia e brita comerciais
DER/PR	03/2025	Sistema de custos	570160 - C.B.U.Q. exclusive fornecimento e transporte do CAP 570160 - C.B.U.Q. - na usina exclusive fornecimento e transporte do CAP
DER/SP	01/2025	Sistema de custos	23.52.02.03 - CONCRETO ASFALTICO USINADO A QUENTE - FAIXA DER 19
DER/SP	01/2025	Sistema de custos	23.52.02.05 - CONCRETO ASFALTICO USINADO A QUENTE - FAIXA DER 12,5
SETOP/MG	01/2025	Sistema de custos	RO-00464 - Concreto asfáltico usinado em usina de asfalto gravimétrica 120t/h faixa C areia e brita comerciais RO-01038 - Usinagem de concreto asfáltico em usina de asfalto gravimétrica de 120t/h faixa C areia e brita comerciais
DER/PR PR-412	04/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DER/PR PR-412 (Matinhos - Praia de Leste)
DNIT PATO PR (UL Pato Branco)	2025	Licitação (traço obra)	Orçamento considerado na licitação do DNIT – PATO rodovias BR-280/PR e BR-163/PR (traço atualmente em uso na malha da U.L)
DNIT PATO PR (UL Londrina)	2024	Licitação (traço obra)	Orçamento considerado na licitação do DNIT – PATO rodovias UL Londrina/PR (traço atualmente em uso na malha da U.L)
DNIT PATO PR (UL Ponta Grossa)	2024	Licitação (traço obra)	Orçamento considerado na licitação do DNIT – PATO rodovias UL Ponta Grossa/PR (traço atualmente em uso na malha da U.L)
Vestena (2021)	2021	Dissertação de mestrado (traço aplicado obra)	Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAFLEX, HiMA e 55/75-e (SBS): caracterização avançada e monitoramento

Nota 1: Os dados de licitações foram obtidos nas páginas da internet do DNIT<sup>28</sup> e DER/PR<sup>29</sup>.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para o serviço em tela, são apresentados, na Tabela 26, os consumos de ligante asfáltico indicados nas diferentes referências consultadas; e, na Tabela 27, as produções horárias das equipes.

Tabela 26 – Consumo de ligante asfáltico para o concreto asfáltico com CAP 50/70

(continua)

Fonte	Origem	Teor de Ligante asfáltico (%)	Descrição
SICRO	Sistema de custos	4,766	Faixa B
SICRO	Sistema de custos	5,545	Faixa C
DER/SP	Sistema de custos	4,857 <sup>1</sup>	Faixa DER 19
DER/SP	Sistema de custos	5,649 <sup>1</sup>	Faixa DER 12,5
SETOP/MG	Sistema de custos	6,323	Faixa C
DER/PR PR-412	Licitação	5,700	-

<sup>28</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>29</sup> Disponível em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio?jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta realizada em maio de 2025.

Fonte	Origem	Teor de Ligante asfáltico (%)	Descrição
DNIT PATO PR (UL Pato Branco)	Licitação (traço obra)	4,900	Faixa C
DNIT PATO PR (UL Londrina)	Licitação (traço obra)	4,800	Faixa C
DNIT PATO PR (UL Ponta Grossa)	Licitação (traço obra)	5,200	Faixa C
Vestena (2021)	Dissertação de mestrado (traço aplicado obra)	4,93	Faixa C

Nota 1: Considerando massa específica 2400kg/m³.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Tabela 27 – Produções das equipes considerando diferentes referências - concreto asfáltico com CAP 50/70

Fonte	Origem	Produção horária da equipe (Toneladas)	Mistura
SICRO	Sistema de custos	99,60	Faixa B e Faixa C
SETOP/MG	Sistema de custos	85,16	Faixa C
DER/PR	Sistema de custos	40,00	Faixa C

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

O teor de ligante asfáltico de uma mistura depende de diversos fatores, como, por exemplo, as propriedades dos agregados, a faixa granulométrica, o tipo de ligante e o método de dosagem. Diante disso, o real teor só será conhecido após a elaboração do projeto de mistura pela empresa executora da obra. Assim, na fase de orçamento, adota-se um teor estimado; contudo, durante a execução, remunera-se o empreiteiro o teor efetivamente utilizado na obra, baseado no projeto de dosagem (Vide NORMA DNIT 031/2024 – ES<sup>30</sup>). No contexto do presente estudo, é justificável a adoção de valores utilizados em misturas dosadas, buscando uma melhor aproximação dos custos finais dos serviços.

Conforme pode-se observar na Tabela 26, os teores de ligante asfáltico utilizados nos sistemas de custos para as misturas com maior tamanho máximo nominal dos agregados variam entre 4,766% e 4,857%; enquanto as misturas de “faixa C” apresentam valores entre 5,545% e 6,323%. Para as informações de dosagens utilizadas em obras no estado do Paraná, três licitações recentes realizadas pelo DNIT no estado indicam teores de 4,8%, 4,9% e 5,2%, respectivamente. A mistura asfáltica utilizada nas simulações de desempenho, oriunda da pesquisa de Vestena (2021), apresenta um teor de ligante de 4,93%, similar aos valores dos traços indicados em licitações recentes do DNIT no estado do Paraná. Diante disso, entende-se razoável utilizar o teor de ligante (CAP 50/70) da mistura considerada nas simulações de desempenho: 4,93%.

<sup>30</sup> Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\\_031\\_2024\\_es.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_031_2024_es.pdf) - consulta realizada em maio de 2025.

Em relação às produções das equipes, é possível observar diferenças importantes nos valores utilizados por diferentes sistemas de custos (Tabela 27). Enquanto o SICRO adota uma produção horária de 99,6 t, o SETOP/MG considera 85,16 e o DER/PR o valor de 40 t/h. Ocorre que as composições das equipes e equipamentos desses sistemas de custos são diferentes.

A real produção de campo dos revestimentos em concreto asfáltico pode variar significativamente, a depender dos equipamentos utilizados e condições de trabalho. Ademais, assim como já observado para o pavimento de concreto, os custos com equipamentos e pessoal (os quais tem relação com a produção da equipe) representam parcela pequena nos custos finais do serviço, sendo os itens mais relevantes os consumos de materiais e o transporte relacionado aos mesmos. Diante disso, considerando os dados levantados, entende-se razoável utilizar os parâmetros de produtividade da execução do concreto asfáltico (CAP 50/70) do SICRO (produção de 99,6 t/h) na análise orçamentária.

### ***Concreto asfáltico com asfalto polímero***

Na Tabela 28, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico modificado por polímero.

Tabela 28 – Relação de referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico utilizando asfalto polímero.

(continua)

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011461 - Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa B - areia e brita comerciais 6416246 - Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa B - areia e brita comerciais
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011466 - Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais 6416248 - Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais
DER/PR	03/2025	Sistema de custos	570360 - C.B.U.Q. c/asf.modificado por polímero exclusive fornecimento e transporte do asfalto
DER/SP	01/2025	Sistema de custos	23.52.02.13 - CONCRETO ASFALTICO USINADO A QUENTE COM POLIMERO - FAIXA DER 19
DER/SP	01/2025	Sistema de custos	23.52.02.15 - CONCRETO ASFALTICO USINADO A QUENTE COM POLIMERO - FAIXA DER 12,5
SETOP/MG	01/2025	Sistema de custos	RO-00470 - Concreto asfáltico usinado em usina de asfalto gravimétrica 120t/h com asfalto polímero faixa C areia e brita comerciais RO-01044 - Usinagem de concreto asfáltico em usina de asfalto gravimétrica de 120t/h com asfalto polímero faixa C areia e brita comerciais
DER/PR PR-170 / PRC-466	04/2024	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DER/PR

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
DNIT PATO PR (UL Pato Branco)	2025	Licitação	Orçamento considerado na licitação do DNIT – PATO rodovias BR-280/PR e BR-163/PR
Raffler (2023)	2023	Dissertação de mestrado	Análise do desempenho à fadiga de ligantes e misturas asfálticas densas em função da origem e da modificação por polímero
Ramos (2023)	2023	Dissertação de mestrado (traço obra)	Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga
Faccin (2018)	2018	Dissertação de mestrado (traços de obras)	Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande Do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente

Nota 1: Os dados de licitações foram obtidos nas páginas da internet do DNIT<sup>31</sup> e DER/PR<sup>32</sup>.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para este serviço, são apresentados na Tabela 29 os consumos de ligante asfáltico modificado por polímero indicados nas diferentes referências consultadas; e na Tabela 30, as produções horárias das equipes.

**Tabela 29 – Consumo de ligante asfáltico para o concreto asfáltico com asfalto polímero**

Fonte	Origem	Teor de Ligante asfáltico (%)	Descrição
SICRO	Sistema de custos	5,317	Faixa B
SICRO	Sistema de custos	6,000	Faixa C
DER/SP	Sistema de custos	4,857 <sup>1</sup>	Faixa DER 19
DER/SP	Sistema de custos	5,774 <sup>1</sup>	Faixa DER 12,5
SETOP/MG	Sistema de custos	5,882	Faixa C
DER/PR PR-170 / PRC-466	Licitação	5,890	-
DNIT PATO PR (UL Pato Branco)	Licitação	4,900	Faixa C
Raffler (2023)	Dissertação de mestrado	5,000 <sup>2</sup>	Faixa C
Ramos (2023)	Dissertação de mestrado (traço obra)	4,830	DERSA - FX III - 60/85E A
Faccin (2018)	Dissertação de mestrado (traços de obras)	5,258 <sup>3</sup>	Faixa C

Nota 1: Considerando massa específica 2400kg/m<sup>3</sup>

Nota 2: Dosagem Superpave

Nota 3: Média de 5 dosagens de obras no Estado do Rio Grande do Sul

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

**Tabela 30 – Produções das equipes considerando diferentes referências - concreto asfáltico com asfalto polímero**

Fonte	Origem	Produção horária da equipe (Toneladas)	Mistura
SICRO	Sistema de custos	99,60	Faixa B e Faixa C
SETOP/MG	Sistema de custos	74,94	Faixa C
DER/PR	Sistema de custos	45,00	Faixa C

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

<sup>31</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/licitacoes/superintendencias/editais-de-licitacoes> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>32</sup> Disponível em: [https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61\\_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81](https://www.transparencia.pr.gov.br/pte/compras/licitacoes/inicio;jsessionid=yaz61_ze720xOX-1-Q6B7FKj-T9Crk8yrLG-hyAD.ssecs75004?windowId=f81) - consulta realizada em maio de 2025.

Conforme pode-se observar na Tabela 29, para os asfaltos modificados por polímero, os teores utilizados nos sistemas de custos para as misturas com maior tamanho máximo nominal dos agregados variam entre 4,856% e 5,317%; enquanto as misturas de “faixa C” apresentam valores entre 5,774% e 6,0%<sup>33</sup>. Licitações recentes realizadas no estado Paraná, e que consideraram ligantes modificados por polímeros, indicaram diferentes teores de asfalto: 5,89% no DER/PR e 4,90% em licitação do DNIT. Cabe lembrar que, na fase de orçamento, adota-se um teor estimado; entretanto, durante a execução, remunera-se o teor efetivamente utilizado na obra.

A mistura asfáltica utilizada nas simulações de desempenho, oriunda da pesquisa de Ramos (2023), apresenta um teor de ligante de 4,83%, próximo ao teor encontrado na mistura pesquisada por Raffler (2023) no estado do Paraná e um pouco menor que a média de cinco traços utilizados em obras no estado do Rio Grande do Sul, relatados no estudo de Faccin (2018). Considerando que se busca avaliar os custos relacionados ao real desempenho dos pavimentos simulados, entende-se razoável utilizar o teor de ligante da mistura considerada nas simulações de desempenho, com teor de 4,83% de asfalto modificado por polímero.

Em relação às produções das equipes, é possível observar diferenças importantes nos valores utilizados por diferentes sistemas de custos (Tabela 30). Enquanto o SICRO adota uma produção horária de 99,6 t, o SETOP/MG considera 74,94 e o DER/PR o valor de 45 t/h. Ocorre que as composições das equipes e equipamentos são diferentes nessas composições. Conforme já abordado para as misturas com CAP 50/70, a real produção de campo dos revestimentos em concreto asfáltico pode variar significativamente, a depender dos equipamentos utilizados e condições de trabalho.

Ademais, os custos com equipamentos e pessoal (que interferem nos custos de produção da equipe) representam parcela pequena nos custos finais do serviço, sendo os itens mais relevantes os consumos de materiais e o transporte relacionado aos mesmos. Diante disso, considerando os dados levantados, entende-se razoável utilizar os parâmetros de produtividade do SICRO (produção de 99,6 t/h) nas análises orçamentárias para as misturas com CAP modificado por polímero.

### ***Concreto asfáltico com asfalto borracha***

Na Tabela 31, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico utilizando asfalto borracha.

<sup>33</sup> Nota = as composições do SICRO para concreto asfáltico com asfalto polímero consideram ligante do tipo 55/75E.

Tabela 31 – Relação de referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico utilizando asfalto borracha.

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011470 - Concreto asfáltico com borracha - faixa B - brita comercial 6416212 - Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa B - brita comercial
SICRO	01/2025	Sistema de custos	4011471 - Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial 6416213 - Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial
DER/PR	03/2025	Sistema de custos	570350 - C.B.U.Q. c/asf.modificado por borracha exclusive fornecimento e transporte do asfalto
DER/SP	01/2025	Sistema de custos	23.52.03.05 - CONCRETO ASFALTICO COM CIMENTO ASFALTICO MODIFICADO POR BORRACHA - FAIXA III
SETOP/MG	01/2025	Sistema de custos	RO-00476 - Concreto asfáltico usinado em usina de asfalto gravimétrica 120t/h com borracha faixa C brita comercial RO-01050 - Usinagem de concreto asfáltico em usina de asfalto gravimétrica de 120t/h com borracha faixa C brita comercial
PM Curitiba <sup>34</sup>	2023	Licitação	Licitação para “Contratação de serviços de manutenção e reparação de pavimentos da malha viária da cidade”
PM Curitiba <sup>31</sup>	2025	Licitação (traço obra)	Licitação para “aquisição de Concreto Asfáltico Usinado” (Dosagem anexa ao processo licitatório)
Bordin (2020)	2020	Dissertação de mestrado (traço obra)	Implantação, acompanhamento e análise de desempenho de trechos monitorados em Santa Maria -RS
Faccin (2018)	2018	Dissertação de mestrado (traço de obra)	Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente

Nota 1: Os dados de licitações foram obtidos nas páginas da internet da PM de Curitiba.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para o serviço em tela, são apresentados, na Tabela 32, os consumos de ligante asfáltico indicados nas diferentes referências consultadas; e na Tabela 33, as produções horárias das equipes.

Tabela 32 – Consumo de ligante asfáltico para o concreto asfáltico com asfalto borracha

Fonte	Origem	Teor de Ligante asfáltico (%)	Descrição
SICRO	Sistema de custos	5,773	Faixa B
SICRO	Sistema de custos	6,000	Faixa C
DER/SP	Sistema de custos	6,375 <sup>1</sup>	Faixa III
SETOP/MG	Sistema de custos	5,882	Faixa C
PM Curitiba	Licitação	6,000	Faixa C
PM Curitiba <sup>2</sup>	Licitação (traço obra)	5,220	Faixa C
Bordin (2020)	Dissertação de mestrado (traço obra)	6,760	DERSA - FX III - 60/85E A
Faccin (2018)	Dissertação de mestrado (traço de obra)	6,020	Faixa B DAER

Nota 1: Considerando massa específica 2400kg/m<sup>3</sup>;

Nota 2: Mistura morna.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

<sup>34</sup> Disponível em: <https://www.transparencia.curitiba.pr.gov.br/sgp/licitacoes.aspx> - consulta realizada em maio de 2025;  
<https://www.transparencia.curitiba.pr.gov.br/sgp/licitacoes.aspx> - consulta realizada em maio de 2025.

Tabela 33 – Produções das equipes considerando diferentes referências - concreto asfáltico com asfalto borracha

Fonte	Origem	Produção horária da equipe (Toneladas)	Mistura
SICRO	Sistema de custos	84,66	Faixa B e Faixa C
SETOP/MG	Sistema de custos	72,38	Faixa C
DER/PR	Sistema de custos	42,00	Faixa C

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Conforme pode-se observar na Tabela 32, os teores de ligante asfáltico (asfalto borracha) utilizados nos sistemas de custos para as misturas com asfalto borracha variam entre 5,773% a 6,375%. Em licitação recente, a Prefeitura Municipal de Curitiba adotou o percentual de 6% para fins de orçamento. Consultando licitações e estudos que disponibilizam traços de misturas com asfalto borracha, pode-se encontrar diferentes valores: 5,22% (traço para o Paraná); 6,76 e 6,02%, para estudos realizados no estado do Rio Grande do Sul.

A mistura asfáltica utilizada nas simulações de desempenho, oriunda da pesquisa de Bordin (2022), apresenta um teor de ligante elevado, igual a 6,76%. Esse teor é resultado das características do agregado utilizado, que apresentava elevada absorção. No entanto, o consumo final de ligante acaba não sendo tão discrepante de outras misturas, em função da baixa massa específica compactada da mistura (2,215 t/m<sup>3</sup>). Considerando que se busca avaliar os custos relacionados ao desempenho dos pavimentos, mantendo-se o mesmo critério ao longo do estudo, entende-se adequado assumir o teor de ligante da mistura com asfalto borracha considerada nas simulações de desempenho: 6,76%.

Em relação às produções das equipes, é possível observar diferenças importantes nos valores utilizados por diferentes sistemas de custos (Tabela 33), podendo-se considerar as mesmas alegações apresentadas para as misturas asfálticas anteriores, assumindo-se, portanto, a produtividade do SICRO (produção de 99,6 t/h - execução de mistura com asfalto borracha).

### ***Concreto asfáltico com asfalto altamente modificado (HiMA)***

Na Tabela 34, são relacionadas as referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico utilizando asfalto altamente modificado (HiMA). Importante destacar que não há composições de custo que consideram especificamente o asfalto do tipo HiMA. Ainda, há informação limitada de dosagens de misturas asfálticas com esse tipo de ligante.



Tabela 34 – Relação de referências consultadas para o serviço de revestimento executado com concreto asfáltico utilizando asfalto HiMA.

Fonte	Ano da referência	Origem	Descrição
Silva (2018)	2018	Dissertação de mestrado	Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas projetadas com cap HiMA e CAP 60/85-E aplicadas na restauração de um trecho da rodovia SC-114
Almeida Jr <i>et al.</i> (2018)	2018	Artigo	Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas
Raffler (2023)	2023	Dissertação de mestrado	Análise do desempenho à fadiga de ligantes e misturas asfálticas densas em função da origem e da modificação por polímero

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Para o serviço em questão, são apresentados, na Tabela 35, os consumos de ligante asfáltico HiMA indicados nas diferentes referências consultadas.

Tabela 35 – Consumo de ligante asfáltico para o concreto asfáltico com asfalto HiMA

Fonte	Origem	Teor de Ligante asfáltico (%)	Descrição
Silva (2018)	Dissertação de mestrado (traço obra)	6,000	Faixa VI do DEINFRA
Almeida Jr <i>et al.</i> (2018)	Artigo	4,700	Faixa C
Raffler (2023)	Dissertação de mestrado	4,600 <sup>1</sup>	Faixa C

Nota 1: Dosagem Superpave.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Conforme pode-se observar na Tabela 35, os teores de ligante asfáltico obtidos em diferentes fontes variaram entre 4,6% e 6,0%. A mistura asfáltica utilizada nas simulações de desempenho, oriunda da pesquisa de Raffler (2023), apresenta um teor de 4,60%. Considerando que se busca avaliar os custos relacionados ao desempenho dos pavimentos, mantendo-se semelhante critério ao longo do estudo, entende-se razoável utilizar o teor de ligante da mistura HiMA considerada nas simulações de desempenho: 4,6%.

Em relação à produtividade, diante da ausência de composições de custo específicas para misturas com asfalto do tipo HiMA, foram adotados os mesmos parâmetros de misturas asfálticas com asfalto polímero do SICRO (produção de 99,6 t/h), todavia considerando um maior consumo de óleo tipo A1 usado na produção da mistura asfáltica, em função da maior temperatura de usinagem em relação à mistura com ligante modificado tipo 55/75E (indicado nas composições do SICRO para asfalto polímero).

Considerando os levantamentos de dados e justificativas expostas neste item, as composições de custo com CP e as misturas asfálticas foram ajustadas, buscando adequar os consumos aos materiais e soluções consideradas no dimensionamento, a fim de obter uma estimativa mais próxima possível das condições reais de execução. Desse modo, os consumos que foram efetivamente assumidos nas composições e análises de custo deste estudo, tanto para os concretos quanto para as misturas asfálticas, são apresentados na Tabela 36 e Tabela 37, respectivamente. Sempre é salutar frisar que os reais consumos de CP e ligantes de CA só seriam conhecidos durante a dosagem dos materiais.

Tabela 36 – Parâmetros adotados nas análises – composições de materiais com cimento Portland

Material	Consumo cimento (kg/m³)	Referência
Concreto compactado com rolo	120,0	Traço de obra e estudo
Concreto compactado com rolo para pavimentos semirrígidos	200,0	Trichês (1993)
Concreto de cimento Portland	392,7	Média de traço de obras

Nota: Os demais consumos e produtividades foram mantidos, seguindo o SICRO.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Tabela 37 – Parâmetros adotados nas análises – composições de misturas com ligante asfáltico

Material	Massa específica compactada (t/m³)	Teor de Ligante (%)	Agregados (m³/t)	Cal (Kg/t)	Referência
Concreto asfáltico com CAP 50/70	2,328	4,93	0,6338	-	Vestena (2021)
Concreto asfáltico com AMP 60/85	2,532	4,83	0,62495	14,2605	Ramos (2023)
Concreto asfáltico com Asfalto borracha	2,215	6,76	0,60917	18,6480	Bordin (2020)
Concreto asfáltico com HiMA	2,445	4,60	0,6360	-	Raffler (2023)

Nota: Os demais consumos e produtividades foram mantidos, seguindo o SICRO.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Ainda, em função das diferentes temperaturas de usinagem dos ligantes asfálticos, foram ajustados os consumos de óleo do tipo A1, conforme demonstrado na Tabela 38.

Tabela 38 – Parâmetros adotados nas análises – consumo de óleo A1 para produção das misturas asfálticas

Característica	Tipo de ligante asfáltico			
	CAP 50/70	AMP 60/85	AB-08	HiMA
Temperatura de usinagem do ligante (°C)	150-155 <sup>1</sup>	160-165 <sup>1</sup>	170-180 <sup>1</sup>	173-178 <sup>1</sup>
Consumo óleo tipo A1 (litros)	8 <sup>2</sup>	11 <sup>3</sup>	14 <sup>2</sup>	14 <sup>3</sup>

Nota 1: Referências temperatura ABEDA<sup>35</sup> e Raffler (2023);

Nota 2: valores de referência do SICRO;

Nota 3: valores estimados com base na temperatura de usinagem.

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Os ajustes ora descritos, conforme destacado por Paulino (2021), são fundamentais para garantir uma análise orçamentária que melhor represente a realidade local:

O consumo dos materiais advém das especificações de serviço ou dos projetos de engenharia, assim como os traços das misturas ou mesmo taxas de aplicação.

**Importa destacar que o projetista tem autonomia para editar os parâmetros e consumos previstos no SICRO com o intuito de ajustar as composições de custos às condições particulares de um caso concreto.**

(Grifo nosso)

Para fins exemplificativos, a Figura 12 demonstra a composição do SICRO “6416248 - Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais”. Conforme pode-se observar na Figura 12, a composição do SICRO considera uma grande quantidade de areia na composição (576 kg para 1 t de CBUQ), de encontro à prática adotada no estado do Paraná; assim como um consumo elevado de cal (aproximadamente 72 kg). Ainda, a composição indica um teor de asfalto de 6%, teor acima dos valores identificados para a região Sul do Brasil de maneira geral. Assim, a adoção desta composição, sem os devidos ajustes, induziria a uma estimativa majorada dos custos na etapa orçamentária.

<sup>35</sup> Disponível em: <https://abeda.org.br/wp-content/uploads/2023/06/temperatura-de-manuseio-e-trabalhos-com-ligantes-asfálticos-a-quente.pdf> - consulta realizada em maio de 2025.

Figura 12 – Composição de custo do SICRO para usinagem de concreto asfáltico com polímero (Faixa C)

CGCIT			Paraná			Produção da equipe			99,60 t		
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO						Janeiro/2025			Valores em reais (R\$)		
Custo Unitário de Referência											
6416248 Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia e brita comerciais											
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário				Custo Horário Total		
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo					
E9559 Aquecedor de fluido térmico - 12 kW		1,00000	1,00	0,00	70,0506	40,0987			70,0506		
E9584 Carregadeira de pneus com capacidade de 1,72 m³ - 113 kW		1,00000	0,80	0,20	205,7533	104,0257			185,4078		
E9021 Grupo gerador - 456 kVA		1,00000	1,00	0,00	400,5469	22,0441			400,5469		
E9558 Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l		2,00000	1,00	0,00	55,8807	38,1706			111,7614		
E9689 Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW		1,00000	1,00	0,00	1.238,4631	657,4090			1.238,4631		
					Custo horário total de equipamentos				2.006,2298		
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário				Custo Horário Total			
P9824 Servente		4,00000	h	28,3906				113,5624			
				Custo horário total de mão de obra				113,5624			
				Custo horário total de execução				2.119,7922			
				Custo unitário de execução				21,2831			
				Custo do FIC				-			
				Custo do FIT				-			
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário				Custo Unitário			
M0028 Areia média		0,38400	m³	115,8055				44,4693			
M0005 Brita 0		0,03200	m³	126,6696				4,0534			
M0191 Brita 1		0,04800	m³	118,7116				5,6982			
M0344 Cal hidratada - a granel		71,99160	kg	0,5895				42,4390			
M1955 Cimento asfáltico de petróleo com polímero - CAP 55/75-E		0,06000	t	0,0000				0,0000			
M1941 Óleo tipo A1		8,00000	l	5,4500				43,6000			
M1103 Pedrisco		0,12800	m³	123,9338				15,8635			
				Custo unitário total de material				156,1234			
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário				Custo Unitário			
				Custo total de atividades auxiliares							
				Subtotal				177,4065			
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário				
M0028 Areia média - Caminhão basculante 10 m³		5914647	0,57600	t	1,8300		1,0541				
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³		5914647	0,04800	t	1,8300		0,0878				
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³		5914647	0,07200	t	1,8300		0,1318				
M0344 Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³		5914363	0,07199	t	17,4000		1,2526				
M1103 Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³		5914647	0,19200	t	1,8300		0,3514				
					Custo unitário total de tempo fixo		2,8777				
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário				
				LN	RP	P					
M0028 Areia média - Caminhão basculante 10 m³		0,57600	tkm	5914359	5914374	5914389					
M0005 Brita 0 - Caminhão basculante 10 m³		0,04800	tkm	5914359	5914374	5914389					
M0191 Brita 1 - Caminhão basculante 10 m³		0,07200	tkm	5914359	5914374	5914389					
M0344 Cal hidratada - a granel - Caminhão silo 30 m³		0,07199	tkm	5914364	5914365	5914366					
M1103 Pedrisco - Caminhão basculante 10 m³		0,19200	tkm	5914359	5914374	5914389					
				Custo unitário total de transporte							
				Custo unitário direto total			180,28				
Obs:											

Obs:

Fonte: SICRO

Ademais, para o cálculo dos quantitativos das emulsões asfálticas, foram adotados os parâmetros indicados na Tabela 39. Importante frisar que, assim como para as misturas asfálticas, os consumos de emulsão efetivamente utilizados em campo serão conhecidos somente durante a fase de execução da obra, sendo na fase orçamentária estimados; e, os empreiteiros seriam remunerados de acordo com as quantidades utilizadas durante a execução.

Tabela 39 – Taxas de aplicação das emulsões

Discriminação	Utilização	Taxa	Fonte
Emulsão tipo EIA	Imprimação	1,3 l/m <sup>2</sup>	SICRO
Emulsão RR-1C	Pintura de ligação	0,45 l/m <sup>2</sup>	SICRO
Emulsão RR-1C	Cura CCR	0,45 l/m <sup>2</sup>	SICRO / Licitação DNIT <sup>36</sup>
Emulsão asfáltica - RR-2C	TSD	4,77 l/m <sup>2</sup>	SICRO

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

#### 2.4.2 Cálculo de transporte e aquisição dos materiais asfálticos

Os custos relativos ao transporte e à aquisição dos materiais asfálticos (fornecedor-canteiro), foram calculados levando-se em conta a Portaria DNIT nº 1.977/2017<sup>37</sup>, de 25 de outubro de 2017, publicada em 26 de outubro de 2017, e o OFÍCIO-CIRCULAR Nº 3784/2025/ACE - DPP/DPP/DNIT SEDE<sup>38</sup>, de 13 de junho de 2025.

Os produtos asfálticos tiveram seus preços de referência para aquisição definidos em função do acompanhamento de distribuição de asfaltos realizado e disponibilizado pela ANP em seu endereço eletrônico<sup>39</sup>, para o estado do Paraná, acrescidos das respectivas alíquotas de PIS/Pasep, COFINS, ICMS e do BDI diferenciado. O preço de referência do ligante modificado do tipo “HiMA” foi obtido por cotações junto à(s) distribuidora(s) de ligante asfáltico, em função da ANP não disponibilizar valores para esse tipo de material. Foi considerada a data-base de janeiro de 2025, em concordância com a referência adotada para as composições do SICRO.

Considerando que no cálculo dos preços divulgados pela ANP são utilizados os preços à vista, sem frete (entre a base de distribuição e o local de entrega do produto), com todos os impostos inclusos, à exceção do ICMS, do PIS/Pasep e da COFINS, os custos de referência para o transporte dos produtos asfálticos foram calculados a partir das equações tarifárias indicadas na Portaria DNIT nº 1.977/2017, com valores atualizados para a data base de janeiro de 2025 (considerando os Índices de Reajustamentos de Obras Rodoviárias do DNIT<sup>40</sup>). Importante destacar que o asfalto borracha é isento de ICMS no estado do Paraná (vide CONVÊNIO ICMS 31/06 e legislação relacionada).

<sup>36</sup> Para a cura da camada de concreto compactado a rolo (CCR) adotou-se uma pintura de ligação com emulsão asfáltica do tipo RR-1C, mesmo critério de projeto recente do DNIT (consumo de 0,45 l/m<sup>2</sup>);

<sup>37</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/documentos/Portaria1977.2017DGProdutosasfalticos.pdf> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>38</sup> Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/preco-de-asfalto/oficio\\_circular\\_3784.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/preco-de-asfalto/oficio_circular_3784.pdf) - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>39</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos> - consulta realizada em maio de 2025;

<sup>40</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/indices-de-reajustamentos/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodoviario> - consulta realizada em maio de 2025.

### 2.4.3 Bonificação e Despesas Indiretas (BDI)

Os preços unitários foram calculados utilizando um valor para a Bonificação e Despesas Indiretas (BDI) de **25,07%**, considerando **orçamento sem desoneração**, em conformidade com o Ofício-Circular DNIT nº 1894/2025 (SEI DNIT nº 20669412)<sup>41</sup>. Para isso, foi considerada a classificação da obra como “**Construção / Restauração de Médio Porte**”, de acordo com a classificação do DNIT (Figura 13). No caso da alíquota de ISSQN (Imposto Sobre Serviço de Qualquer Natureza), o percentual utilizado foi de 3%. A Tabela 40 apresenta a composição do BDI.

Figura 13 – Classificação das obras de construção e restauração rodoviária

Natureza das Obras	Porte da Obra		
	Pequeno Porte	Médio Porte	Grande Porte
Construção rodoviária	Até 15 km de pista simples por ano	De 15 a 30 km de pista simples por ano	Acima de 30 km de pista simples por ano
Restauração rodoviária	Até 20 km de pista simples por ano	De 20 a 40 km de pista simples por ano	Acima de 40 km de pista simples por ano

Fonte: SICRO

Tabela 40 - Bonificação e Despesas Indiretas (BDI)

Descrição das Parcelas		Médio Porte	
Despesas Indiretas		% sobre PV	% sobre CD
Administração Central	Variável - f (CD)	4,69	6,00
Despesas Financeiras	1,12% sobre (PV - Lucro)	1,05	1,34
Seguros e Garantias Contratuais	0,25% do PV	0,25	0,32
Riscos	0,50% do PV	0,50	0,64
<b>Subtotal 1</b>		<b>6,49</b>	<b>8,30</b>
Benefícios		% sobre PV	% sobre CD
Lucro	Variável - f (CD)	6,65	8,50
<b>Subtotal 2</b>		<b>6,65</b>	<b>8,50</b>
Tributos		% sobre PV	% sobre CD
PIS	0,65% do PV	0,65	0,81
COFINS	3,00% do PV	3,00	3,75
ISSQN	3% do PV	3,00	3,75
<b>Subtotal 3</b>		<b>6,65</b>	<b>8,32</b>
<b>Total - BDI (%)</b>		<b>19,79</b>	<b>25,07</b>

Fonte: Autores

<sup>41</sup> Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/bdi/bdi-sicro/anexo-bdi-sicro\\_2025-selic-14-25.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/bdi/bdi-sicro/anexo-bdi-sicro_2025-selic-14-25.pdf) - consulta realizada em maio de 2025.

Para os **materiais betuminosos**, adotou-se um **BDI diferenciado de 15,00%**, sem desoneração, em conformidade com a Instrução Normativa DNIT nº 62/DNIT SEDE<sup>42</sup>, de 17 de setembro de 2021.

#### 2.4.4 Distâncias médias de transporte (DMTs) adotadas

As distâncias médias de transporte (DMTs) adotadas no presente estudo são apresentadas na Tabela 41.

Tabela 41 – Distâncias de médias de transporte (DMT's) adotadas

Material	Percurso		Distância de Transporte (km)		
	Origem	Destino	LN	RP	P
Brita	Pedreira	Obra		50	
Brita	Pedreira	Canteiro		0,50	
Areia	Areal	Canteiro		50	
Cal hidratada	Fábrica	Canteiro			250
Materiais asfálticos	Refinaria/Distribuidora	Canteiro			250
Cimento e aditivos	Fábrica	Canteiro			250
Aço	Fábrica	Obra			250
Materiais de sinalização	Distribuidor	Obra			250
Outros materiais (desmoldante, lona, etc)	Distribuidor	Obra			250
Brita graduada	Canteiro	Obra		50	
CCR	Canteiro	Obra		50	
CCP	Canteiro	Obra		50	
Concreto asfáltico	Canteiro	Obra		50	

Nota: LN = Leito Natural; RP = Revestimento primário; P = Pavimentado.

Fonte: Autores

Em virtude deste estudo buscar uma comparação das alternativas de pavimentos asfálticos e pavimentos de concreto, adotaram-se distâncias médias de transporte iguais para os transportes de CP e materiais asfálticos, assim como para as distâncias do canteiro até a obra. Tal critério buscou a isonomia nas análises orçamentárias. Todavia, cabe destacar que as distâncias de transporte têm impacto importante no preço final das obras de pavimentação, devendo ser ajustadas para a realidade de cada projeto.

<sup>42</sup> 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/instrucoes-normativas/instrucao-normativa-no-62\\_dnit-sede.pdf/view](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/instrucoes-normativas/instrucao-normativa-no-62_dnit-sede.pdf/view) - consulta realizada em maio de 2025.



#### **2.4.5 Limitações do estudo relacionadas à análise orçamentária**

Por tratar-se de um estudo comparativo e não um orçamento de uma obra real, os valores estimados apresentam algumas limitações, podendo-se destacar:

- a) Os orçamentos realizados contemplam os custos diretos, acrescidos do BDI, não considerando os custos indiretos (que são relacionados às características específicas de cada obra);
- b) Foram considerados os custos relacionados à execução das camadas dos pavimentos e sinalização horizontal, sem contemplar os custos de serviços preliminares, terraplenagem, sinalização vertical, entre outros;
- c) As composições de custo do estudo não consideram o Fator de Interferência do Tráfego (FIT), que é relacionado às características específicas de cada obra;
- d) As DMTs foram arbitradas, representando os valores adotados no presente trabalho;
- e) Não foi realizada a pesquisa local de preços para os itens mais relevantes do orçamento, de acordo com a orientação indicada no Manual do SICRO e a Instrução Normativa DNIT nº 10/SEDE, de 9 de outubro de 2024<sup>43</sup>.

Contudo, é importante destacar que, dentro das limitações impostas pelo tipo de estudo, buscou-se ajustar as composições e os custos o mais próximo das condições reais, a fim de não distorcer os resultados em prol de alguma alternativa executiva.

#### **2.5 Análise das emissões de CO<sub>2</sub>**

A quantificação de GEE é geralmente realizada a partir da quantificação de materiais e serviços necessários para a obtenção do produto final. Neste estudo, a quantificação das emissões de GEE foi realizada a partir do levantamento dos quantitativos de materiais necessários para executar as estruturas dimensionadas para cada nível de tráfego investigado. Somado a esse inventário, o gasto energético das operações de usinagem de misturas asfálticas, CCP, BGS e CCR foram traduzidas em litros de diesel.

Além disso, a quantidade de combustível de transporte dos materiais vinculadas à etapa de execução dos pavimentos foi calculada. Estes quantitativos de materiais e de combustível foram então multiplicados por seus respectivos fatores de emissão de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq), obtendo-se,

<sup>43</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/central-de-conteudos/atos-normativos/tipo/instrucao-normativa/2024/instrucao-normativa-no-10-2024> - consulta realizada em maio de 2025.

assim, as emissões totais para cada solução de pavimento. As premissas das normas ISO 14040 e 14044 e o sistema SICRO foram utilizados.

### **2.5.1 Unidade funcional**

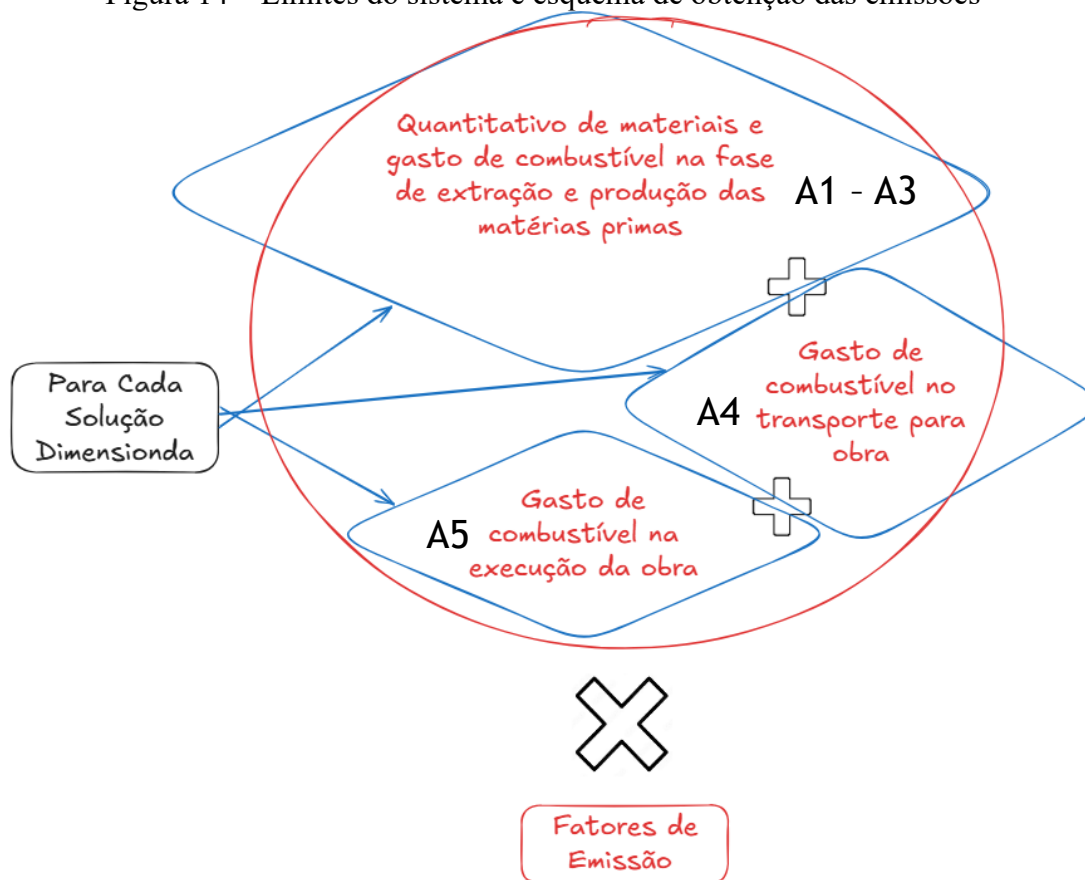
A uniformização da unidade funcional possibilita a comparação entre diferentes estudos. Neste estudo, foi adotada a unidade funcional de 1 km de comprimento (com pista de 7,20 m de largura total e 5,00 m de largura total de acostamento), totalizando uma área de 12.200 m<sup>2</sup> de pavimentação por km. As espessuras das camadas são variáveis conforme os dimensionamentos.

A unidade funcional definida para o estudo foi tCO<sub>2</sub>eq/km de pavimento. Sendo CO<sub>2</sub>eq a medida mais usual de GEE, responsáveis pelo aquecimento global. Os outros GEEs (Metano e Óxido Nitroso) são convertidos para uma “equivalência de CO<sub>2</sub>”, já contabilizada nos fatores de emissão levantados e apresentados, a seguir, nesta pesquisa.

### **2.5.2 Limites do sistema**

As emissões de CO<sub>2</sub>eq foram obtidas para um sistema que tem início na extração dos materiais, e fim na entrega do pavimento executado (Figura 14). As fronteiras são determinadas pelos grupos A1-A3, onde calcula-se o quantitativo de materiais utilizados, o dispêndio de combustível até a usina, e o gasto de energia convertido em gasto de combustível para o funcionamento da usina. Após os insumos prontos, foi calculado o gasto de combustível com o transporte destes insumos para ao local de obra (A4), e, posteriormente, o consumo de combustível com a execução do pavimento (A5). Todos esses quantitativos foram então multiplicados pelos fatores de emissão de cada material, gerando os valores finais de emissão por quilometro de pavimento.

Figura 14 – Limites do sistema e esquema de obtenção das emissões



Fonte: Autores

### 2.5.3 Utilização do SICRO para contabilização das emissões

O cálculo de emissões foi possível a partir do SICRO, que possibilitou a estimativa de quantitativos dos serviços das alternativas estudadas. Este método para estimar CO<sub>2</sub> foi também utilizado por Teles *et al.* (2024) na investigação de emissões em obras rodoviárias.

O emprego das composições do SICRO foi possível porque ela associa as quantidades de projeto com as Composições de Custos Unitários (CCUs). As CCUs são ferramentas que detalham, sobretudo de forma quantitativa, os insumos necessários para um serviço. Graças à sua natureza analítica, o SICRO fornece não apenas os custos, mas também dados como a produção da equipe, consumo de materiais e potência dos equipamentos, tornando-o uma fonte de informações importante para diversos estudos.

Para a investigação das emissões, as CCUs de todos os materiais e serviços necessários para a construção de um quilometro de pavimento foram utilizadas para compor um quantitativo de todos os materiais e recursos necessários. Avaliam-se os quantitativos de todas as fases de produção dos

materiais, desde a extração da matéria-prima até o transporte para produção dos materiais beneficiados.

O passo seguinte consiste em analisar o consumo de combustível gerado pelo transporte dos materiais, abrangendo o percurso de usina até o local de execução do serviço. Por fim, são quantificados o consumo de combustível dos equipamentos empregados na realização do serviço.

A etapa de decomposição das composições de custos unitário é fundamental para dividir as emissões nos grupos especificados A1-A3, A4 e A5, pois, dentro de uma mesma composição, as emissões podem ser alocadas em distintos grupos. O processo de decomposição é realizado de forma hierárquica: as quantidades das CCUs de atividades auxiliares são multiplicadas pelas suas respectivas quantidades na CCU principal. Esse procedimento é repetido em cascata, caso as atividades auxiliares possuam outras subatividades. O mesmo método é aplicado para o tempo fixo, onde as quantidades resultantes são multiplicadas pelos equipamentos especificados nas CCUs correspondentes.

Ao final, a decomposição resulta em um inventário completo de todos os insumos dos serviços necessários à execução da obra, independentemente de sua origem na CCU principal, nas atividades auxiliares ou no tempo fixo. O SICRO também apresenta as composições/equipes de cada serviço, já com os valores de produtividade, considerando o rendimento de cada operação conforme já demonstrado na Figura 10. O Caderno do SICRO<sup>44</sup> traz o consumo de combustível de cada equipamento.

#### 2.5.4 Etapa de produção dos materiais

A emissão de CO<sub>2</sub> na produção das matérias-primas e materiais posteriormente processados (mistura asfáltica, CCP, entre outros) foi obtida pelo somatório do produto entre as massas dos materiais (por unidade do serviço) e os fatores de emissão de CO<sub>2</sub>eq, acrescidos do gasto energético das operações de usinagem (em termos do combustível empregado nesta operação) e do combustível consumido com o transporte dos insumos para a usina, conforme demonstrado na Equação 6:

$$CO_{2eq} (A1 - A3) = \sum (FCO_{2i} \times massa_i) + FCO_{2diesel} \times Cons. Comb (A2) + Cons. Usi (l) \times FCO_{2diesel} \quad [6]$$

<sup>44</sup> Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-referenciais/sistemas-de-custos/sicro/relatorios/parametros-de-equipamentos/caderno-tecnico\\_parametros-de-equipamentos-ref-jan-2025.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-referenciais/sistemas-de-custos/sicro/relatorios/parametros-de-equipamentos/caderno-tecnico_parametros-de-equipamentos-ref-jan-2025.pdf) - consulta realizada em maio de 2025.

Onde:

$FCO_{2i}$  = Fator de emissão de  $CO_{2eq}$  de cada material utilizado ( $kgCO_2/t$ );

$massa_i$  = Massa de cada material utilizado (t);

$FCO_{2diesel}$  = Fator de emissão de  $CO_{2eq}$  do diesel ( $kgCO_2/l$ );

$Cons. Comb. (A2)$  = Consumo de combustível (l)

$Cons. Usi (l)$  = Gasto energético traduzido em consumo de combustível para funcionamento das operações elétricas da usina

A massa dos materiais é extraída diretamente dos volumes necessários dado o volume das camadas estruturais do pavimento e as áreas de pintura de ligação, imprimação e pintura de demarcação viária.

Já os fatores de emissão de  $CO_{2eq}$  relacionados à produção dos materiais foram obtidos por meio de pesquisa bibliográfica baseada, primariamente, no cenário nacional, acrescida de referências internacionais na ausência das primeiras. Esses fatores estão apresentados em seção futura deste documento.

### 2.5.5 Etapa de operações de transporte

O cálculo de emissões das operações de transporte, essenciais para o deslocamento de materiais até o local de execução da obra, é influenciado por diversos fatores. As variáveis incluem as DMTs do projeto; a potência dos equipamentos; coeficiente de consumo de combustível; a fração produtiva de cada equipamento transportador empregado (todos obtidos a partir da decomposição dos CCUs do SICRO); e a massa dos materiais a serem transportados. O primeiro passo neste processo é a determinação do consumo de combustível associado a essas operações, conforme detalhado na Equação 7:

$$Cons. Comb. (A4)(l) = \sum \left( \frac{Coef. Comb. equip. (l/Kwh) \times Pot_{equip. (KW)}}{Prod. equip. \left( \frac{t}{km} \right)} \right) \times m_{transp} (t) \times DMT (Km) CO_{2diesel} \quad [7]$$

A partir daí, o somatório total de combustível utilizado é multiplicado pelo fator de emissão do combustível (diesel) – Equação 8:

$$CO_{2eq} (A4) = Cons. Comb. (l) \times FCO_{2diesel} (kgCO_{2eq}/l) \quad [8]$$

Onde:

$Cons. Comb.$  = Consumo de combustível (l);

$m_{transp}$  = Massa de cada material utilizado (t);

$FCO_2\ diesel$  = Fator de emissão de  $CO_2eq$  do diesel ( $kgCO_2/l$ );  
 $Pot_{equipam.}$  = Potência do equipamento (KW/h)  
 $U_{oper.equipam.}$  = Unidade operativa do equipamento (Quantidade x Operativa)  
 $Coef. Comb_{equipam.}$  = Coeficiente de combustível do equipamento (l/KW)  
 $Prod_{equip.}$  = Produtividade do equipamento (t/h)

### 2.5.6 Execução dos pavimentos

Assim como para as operações de transporte, a emissão de  $CO_2$  é diretamente proporcional ao consumo de combustível dos equipamentos durante as atividades de execução de cada etapa do pavimento. Este consumo pode ser determinado da seguinte maneira (Equações 9 e 10):

$$Cons. Comb. (A5) = \sum \left( \frac{Coef. Comb_{equip.} (l/KWh) \times Pot_{equip.} (KW) \times U_{oper.equip.}}{Prod_{serv.}} \right) \times Quan_{serv.} \quad [9]$$

$$CO_2eq (A5) = Cons. Comb. \times FCO_2\ diesel \quad [10]$$

Onde:

$Cons. Comb$  = Consumo de combustível (l)  
 $FCO_2\ i$  = Fator de emissão de  $CO_2eq$  de cada material utilizado ( $kgCO_2/t$ );  
 $Quan_{serv.}$  = Quantidade do serviço (unidade a depender do serviço);  
 $FCO_2\ diesel$  = Fator de emissão de  $CO_2eq$  do diesel ( $kgCO_2/l$ );  
 $Pot_{equipam.}$  = Potência do equipamento (KW);  
 $U_{oper.equipam.}$  = Unidade operativa do equipamento (Quantidade x Operativa);  
 $Coef. Comb_{equipam.}$  = Coeficiente de combustível do equipamento (l/KWh);  
 $Prod_{serv.}$  = Produtividade do serviço (unidade a depender do serviço).

### 2.5.7 Total do serviço

A emissão de total de  $CO_2eq$  para a execução do pavimento é, então, obtida pela soma das parcelas de produção dos materiais (A1-A3), operações de transporte (A4) e execução do pavimento (A5) – Equação 11:

$$KgCO_2eq (A1 - A5) = KgCO_2eq (A1 - A3) + KgCO_2eq (A4) + KgCO_2eq (A5) \quad [11]$$

### 2.5.8 Fatores de emissão dos materiais empregados na pavimentação

Para o cálculo das emissões de  $CO_2eq$ , os fatores de emissão de cada material empregado precisam ser discretizados. Uma busca na literatura foi realizada a fim de se obter valores médios desses fatores. Foram priorizados, em um primeiro momento, dados do cenário nacional. Contudo,

foi necessário buscar informações de estudos internacionais devido à escassez destas informações na literatura nacional, somada à dificuldade em se avaliar a qualidade e condições de contorno dos dados. Os fatores de emissão médios considerados para cada material estão expressos em kgCO<sub>2</sub>eq junto às referências consultadas.

A determinação do fator de emissão foi realizada por média simples em relação aos valores encontrados em literatura. Todos os fatores podem ser observados na Tabela 42.

Tabela 42 – Fatores de emissão para cada material utilizado ao longo do estudo

(continua)

Material (Produção do insumo)	Unid.	Emissão Adotada kgCO <sub>2</sub> eq	Referência
Areia	t	8,34	1. SIDAC (2025) = 12.51 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Teles <i>et al.</i> (2024) = 5.45 kgCO <sub>2</sub> eq/t 3. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 7.07 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Agregado Britado	t	4,42	1. SIDAC (2025) = 4,669 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Santoro e Kripka (2015) = 4,007 kgCO <sub>2</sub> eq/t 3. LCAPave (FHWA) (2015) = 4,200 kgCO <sub>2</sub> eq/t 4. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 4.81 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Asfalto CAP 50/70	t	369,05	1. Thives e Ghisi (2017) = 427 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Asphalt Institute (2019) = 432 kgCO <sub>2</sub> eq/t 3. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 230.26 kgCO <sub>2</sub> eq/t 4. Blomberg <i>et al.</i> (2012) = 226 kgCO <sub>2</sub> eq/t 5. Eurobitumen (2025) = 530 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Asfalto AMP 60/85	t	494,95	1. Asphalt Institute (2019) = 694 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Blomberg <i>et al.</i> = 295.91 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Asfalto AB-08	t	398,79	1. Asphalt Institute (2019) = 560 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 237.59 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Asfalto HiMA	t	620,85	Estimado
Óleo tipo A1	l	4,00	1. Teles <i>et al.</i> (2024) = 4 kgCO <sub>2</sub> eq/l
Emulsão asfáltica para imprimação	t	212,37	1. Chehovits e Galehouse = 221 kgCO <sub>2</sub> eq/ton 2. Blomberg <i>et al.</i> (2012) = 203.74 kgCO <sub>2</sub> eq/ton
Emulsão asfáltica - RR-1C	t	212,37	1. Chehovits e Galehouse = 221 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Blomberg <i>et al.</i> (2012) = 203.74 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Emulsão asfáltica - RR-2C	t	212,37	1. Chehovits e Galehouse = 221 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. Blomberg <i>et al.</i> (2012) = 203.74 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Cimento Portland CP II - 32	t	752,34	1. SIDAC (2025) – CP II-F = 762.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. MME (2011) = 700 kgCO <sub>2</sub> eq/t 3. Teles <i>et al.</i> (2024) = 706.28 kgCO <sub>2</sub> eq/t 4. Thives e Ghisi (2017) = 820.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 5. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 830.64 kgCO <sub>2</sub> eq/t 6. DER/PR (2024) = 729.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Aditivo para concreto	t	1.876,60	1. European Federation of Concrete (2021)
Aço CA-25	t	1.465,53	1. SIDAC (2025) – CP II-F = 762.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 2168.35 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Aço CA-50	t	1.411,38	1. SIDAC (2025) – CP II-F = 762.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 2060.06 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Aço CA-60	t	1.411,38	1. SIDAC (2025) – CP II-F = 762.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 2060.06 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Aço-carbono	t	1.411,38	1. SIDAC (2025) – CP II-F = 762.7 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 2060.06 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Tinta à base de resina acrílica *	t	592,00	Estimado
Microesferas de Vidro *	t	936,00	Emissão do vidro laminado - Estimado
Massa Termoplástica *	t	1.600,00	Estimado



Material (Produção do insumo)	Unid.	Emissão Adotada kgCO <sub>2</sub> eq	Referência
Cal	t	<b>1.293,82</b>	1. MME (2011) – cal hidratada = 1100 kgCO <sub>2</sub> eq/t 2. SIDAC (2025) – CH-I = 817.27 kgCO <sub>2</sub> eq/t 3. SIDAC (2025) – CH-II = 819.3 kgCO <sub>2</sub> eq/t 4. SIDAC (2025) – CH-III = 732.1 kgCO <sub>2</sub> eq/t 5. Teles <i>et al.</i> (2024) – cal = 2114.3 kgCO <sub>2</sub> eq/t 6. EcoInvent (SimaPro 9.5) = 1171.43 kgCO <sub>2</sub> eq/t
Diesel	l	<b>3,20</b>	1. Carvalho -IPEA (2011)
Gasolina	l	<b>2,80</b>	1. Carvalho - IPEA (2011)
* Valores com baixa confiabilidade			

Fonte: Autores, com base nas informações consultadas e indicadas

Não foram encontrados valores de fator de emissão para ligante asfáltico HiMA, de forma que este valor foi estimado a partir da diferença entre o ligante CAP 50/70 e o AMP 60/85 multiplicada por dois, e somado ao asfalto base CAP 50/70, projetando, assim, o dobro de polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) utilizado no Ligante HiMA.

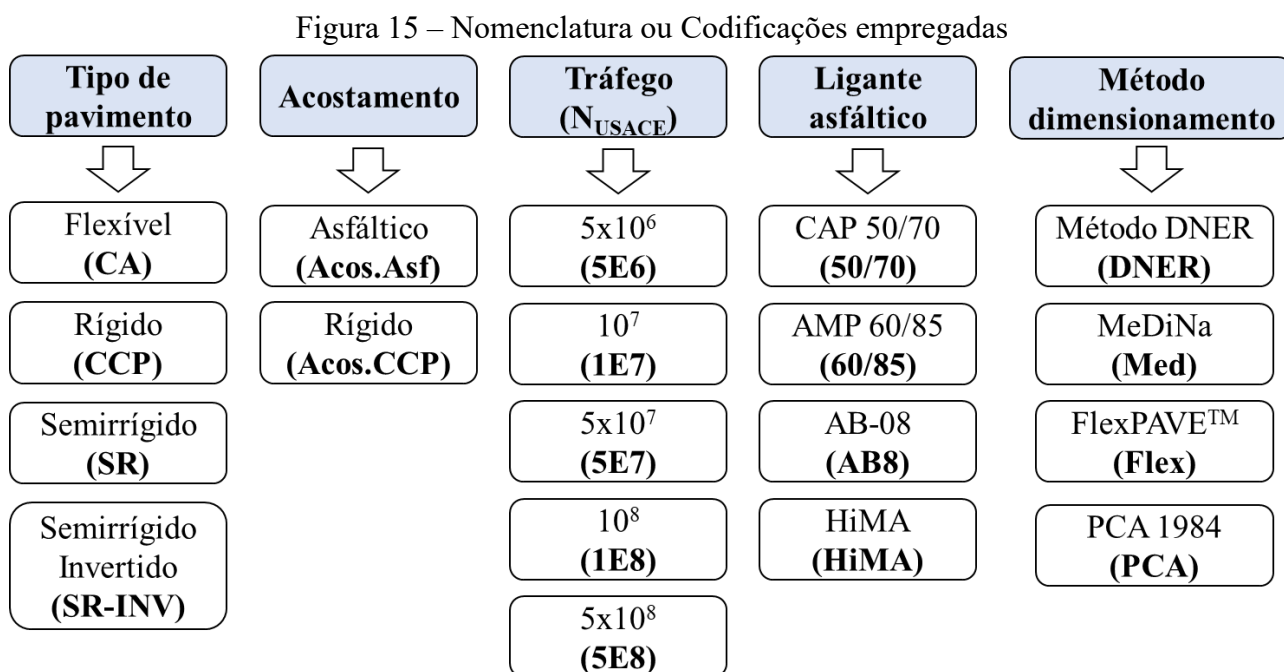
Os valores para microesferas de vidro, tintas e massa termoplástica também não foram encontrados, e utilizou-se então estimativas simples baseadas em materiais similares. Contudo, em face ao baixo consumo desses materiais no contexto da pavimentação, tais adoções trarão pouca influência no cômputo total das emissões para cada uma das alternativas de pavimentação estudadas.

Valores de fator de emissão de agregados britados, cimento CP II e cal apresentaram resultados muito semelhantes para todas as referências, já os ligantes asfálticos possuem maior variação, vinculada à sua grande variabilidade produtiva, como o modo de extração do petróleo, fonte, rota marítima, distâncias de transportes para refinarias e a própria composição química do petróleo.

Em relação ao fator do diesel, importante na estimativa de emissão dos veículos e equipamentos, cabe ressaltar que os índices apresentados consideram a produção do diesel, mas também o seu transporte e emissão pela combustão dos motores conforme discretizado em IPEA (2011).

### 3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados e análises serão apresentados em dois itens: (i) Análise orçamentária; e (ii) Análise das emissões de CO<sub>2</sub>. Considerando a grande quantidade de estruturas e condições avaliadas, na Figura 15 são apresentas as codificações empregadas no decorrer do texto.



Fonte: Autores

#### 3.1 Análises orçamentárias

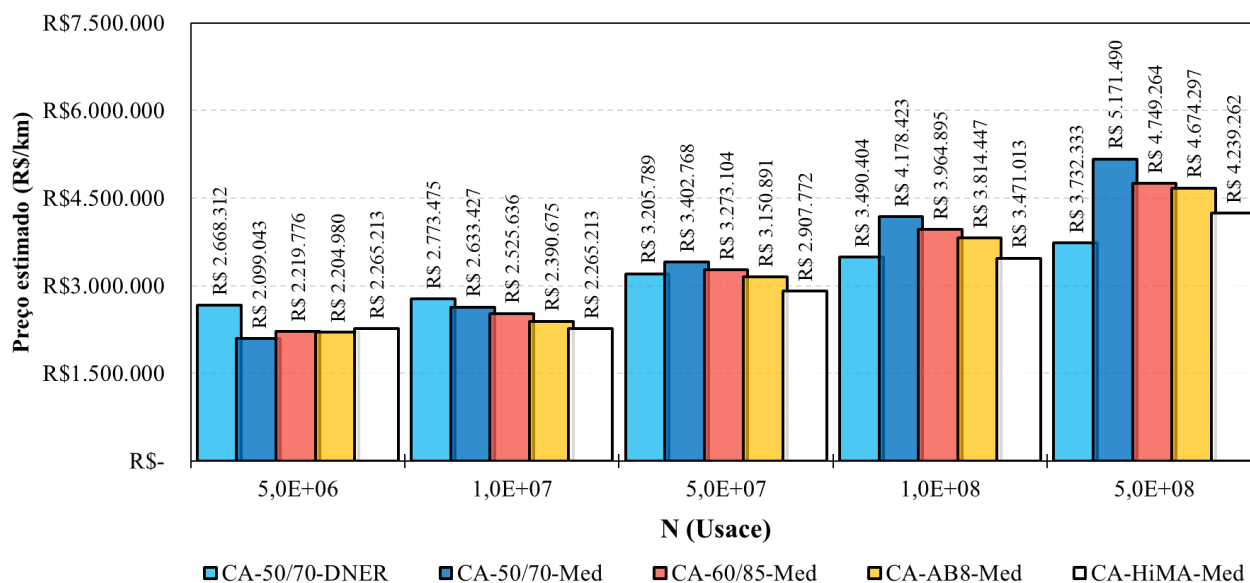
As análises orçamentárias serão apresentadas em quatro seções, a saber: (i) pavimentos asfálticos; (ii) pavimentos rígidos; (iii) comparações entre as diferentes soluções; e (iv) avaliações complementares.

Importante destacar que os valores apresentados contemplam os custos diretos, acrescidos do BDI, conforme os critérios detalhados na metodologia, atendo-se apenas às camadas das estruturas dos pavimentos, assim como a sinalização horizontal. Os orçamentos apresentados neste relatório refletem as soluções de pavimentos, tráfegos, métodos de dimensionamento e materiais considerados no estudo.

### 3.1.1 Análise orçamentária – pavimentos asfálticos

Na Figura 16 são apresentados os valores totais estimados para a implantação de 1 km das estruturas de pavimentos asfálticos, considerando diferentes condições de tráfego, materiais asfálticos e os dois métodos de dimensionamento (DNER e MeDiNa).

Figura 16 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas em pavimento asfáltico



Fonte: Autores

Conforme pode-se observar na Figura 16, de maneira geral, o aumento das espessuras das camadas de revestimento, ocasionado pelo acréscimo nas solicitações de tráfego, resulta em maiores valores estimados para construção das estruturas, demonstrando a sensibilidade dos pavimentos asfálticos às condições de tráfego, especialmente para valores de  $N_{USACE}$  maiores que  $5,0E+07$ .

Os resultados também demonstram o impacto do método de dimensionamento nos valores estimados, com diferenças importantes entre as soluções obtidas com o método do DNER e o MeDiNa. Para misturas com ligante convencional (CAP 50/70), o método do DNER, em comparação com o método MeDiNa, resulta em maiores preços estimados para as condições de tráfego  $N_{USACE}$  até  $1,0E+07$ ; e menores preços para as demais condições de tráfego. Para  $5,0E+06$ , a solução dimensionada com CAP 50/70 pelo método DNER é 27,1% mais onerosa que a solução calculada pelo MeDiNa; enquanto para o tráfego de  $5,0E+08$ , a estrutura obtida no MeDiNa resulta em um preço 38,5% superior à estrutura calculada pelo método DNER. Isto ocorre, porque no método do

DNER, a partir de  $5,0E+07$ , a espessura mínima de revestimento mantém-se constante e igual à 12,5 cm.

Em relação ao emprego de ligante convencional (CAP 50/70), é pertinente realizar um alerta relativo à sua indicação para condições de tráfego elevadas. Apesar de as estruturas propostas atenderem ao método do DNER ou critérios de fadiga no dimensionamento pelo MeDiNa, misturas com CAP 50/70 são bastante sensíveis aos ATR. A mistura com CAP 50/70 considerada nas análises tem um *Flow Number* igual a 634 ciclos. Conforme o manual do MeDiNa (Tabela 2), essa mistura atenderia a tráfegos entre  $10^7 \leq N < 10^8$  para condições normais, e  $10^6 \leq N < 10^7$  para condições severas<sup>45</sup>. Ademais, Ceratti *et al.* (2015) não recomendam o emprego de CAP 50/70 para tráfegos superiores a  $10^7$ . Ainda, Faccin *et al.* (2021) compilaram dados de *Flow Number* de 37 misturas densas e quentes com CAP 50/70 estudadas ou aplicadas em obras no estado do Rio Grande do Sul, encontrando valores entre 29 e 822 ciclos, com média de 286 ciclos. Diante disso, entende-se que, para condições de tráfego elevadas, a utilização de ligante convencional do tipo CAP 50/70, provavelmente, não atenderá adequadamente aos parâmetros de desempenho à deformação permanente, sendo necessária a utilização de ligantes modificados. Tal necessidade se justifica também em função das condições climáticas e aumento das temperaturas no Brasil.

Diferente do método do DNER, o MeDiNa possibilita avaliar o impacto dos ganhos de desempenho com o uso de ligantes modificados nos preços estimados de construção das estruturas. Apesar das misturas com ligante modificado apresentarem maiores preços unitários em relação à mistura com ligante convencional, o melhor desempenho à fadiga das misturas com asfaltos especiais possibilitou a redução das espessuras de revestimento, ocasionando estruturas mais econômicas que as dimensionadas com CAP 50/70 para a maioria das condições de tráfego, à exceção de  $N_{USACE}$  igual a  $5,0E+06$ .

Para as estruturas dimensionadas pelo MeDiNa, a solução com CAP 50/70 apresentou-se mais vantajosa financeiramente em relação as com ligantes modificados apenas para o tráfego de  $5,0E+06$  (onde todas tem espessura de revestimento de 5 cm, mínimo do método MeDiNa, sem que o limite de área trincada tivesse sido alcançado). Para as demais condições de tráfego, as estruturas com

<sup>45</sup> Segundo a versão mais atual do MeDiNa (1.1.9.0 de abril de 2023), as condições de tráfego e da via “Normais” são aquelas quando se tem velocidades acima 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Por outro lado, as condições Severas implicam em tráfego lento (velocidade menor do que 60 km/h), intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada. Considera-se a temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico quando a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, a 20 mm de profundidade, determinada conforme norma AASHTO M 323 – *Superpave Volumetric Mix Design*, for igual ou inferior a 64°C. Quando a mesma temperatura máxima média for superior a 64°C, então considera-se elevada.

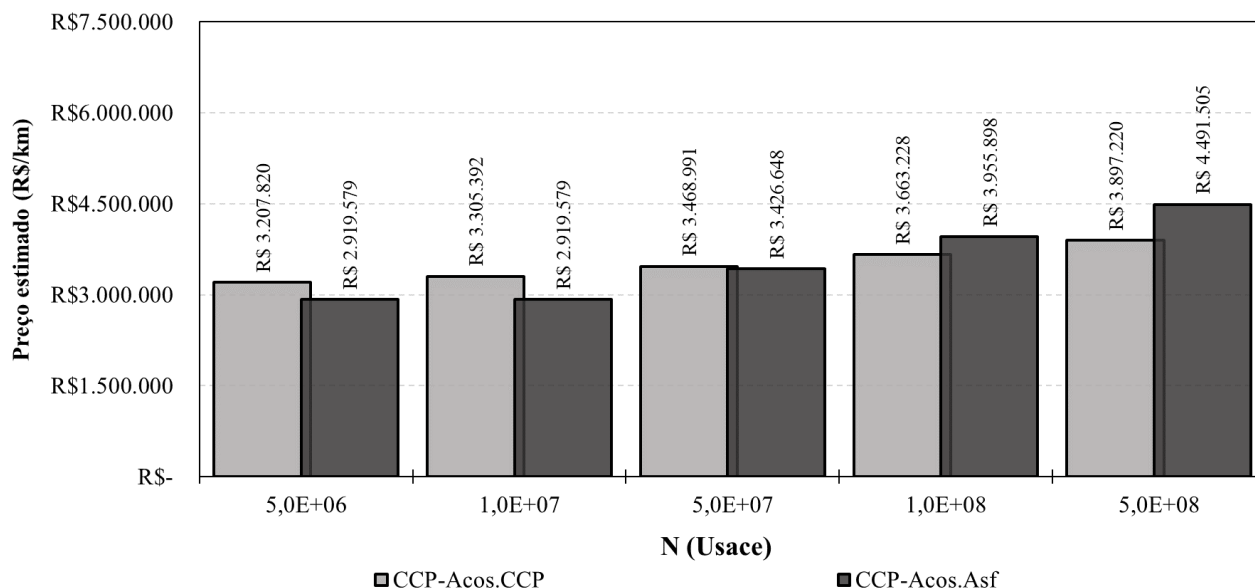
ligantes modificados foram mais vantajosas que as estruturas com CAP 50/70, demonstrando a viabilidade econômica da utilização dos ligantes modificados.

Para os tráfegos entre 1,0E+07 e 5,0E+08, as estruturas dimensionadas pelo MeDiNa com asfalto tipo HiMa foram as que apresentaram os menores preços finais estimados. A razão da viabilidade econômica do HiMA para essas condições de tráfego concentra-se em seu elevado desempenho à fadiga e consequente redução das espessuras do revestimento. O HiMA, em termos de viabilidade econômica, foi seguido das misturas com asfalto borracha<sup>46</sup> e AMP 60/85, respectivamente.

### 3.1.2 Análise orçamentária – pavimentos de concreto de cimento Portland

Na Figura 17, são apresentados os valores totais estimados para a implantação de 1 km das estruturas de pavimentos de CCP, considerando diferentes condições de tráfego e soluções para os acostamentos (com ou sem acostamento em CCP).

Figura 17 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas em pavimento de concreto de cimento Portland



Fonte: Autores

<sup>46</sup> Cabe frisar que o Asfalto Borracha tem isenção de ICMS no Estado do Paraná (Estado adotado como referência no presente estudo).

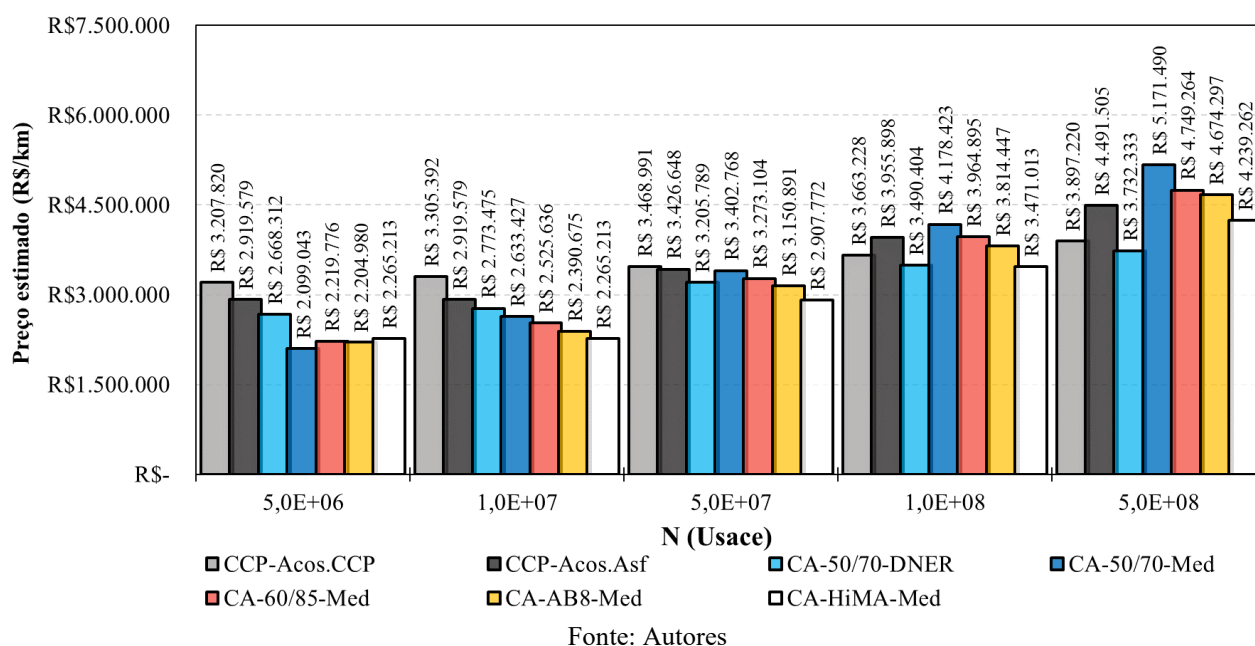
Para as condições de tráfego até  $N_{USACE}=5,0E+07$ , conforme pode-se depreender da Figura 17, os pavimentos rígidos com acostamento asfáltico apresentam menores valores estimados por km quando comparados às estruturas com acostamento em CCP. Todavia, para tráfegos iguais ou superiores a  $1,0E+08$ , as soluções com acostamento em pavimento flexível (utilizando mistura asfáltica com CAP 50/70) apresentam maiores valores que aquelas dimensionadas com acostamento em CCP. Cabe destacar que, conforme já demonstrado nesse documento, a prática mais recente do DNIT e dos Departamentos Estaduais é a utilização de acostamentos em CCP.

Diferentemente dos pavimentos asfálticos, conforme pode-se observar na Figura 17, os pavimentos de CCP, especialmente com acostamento rígido, sofrem pequenos incrementos de espessura à medida que o tráfego aumenta (vide Tabela 12), ocasionando pequenas variações de preços estimados entre os diferentes níveis de tráfego. Para o caso de acostamento em CCP, o tráfego  $N_{USACE}$  de  $5,0E+06$  resulta em um preço estimado de R\$ 3.207.820, enquanto para um tráfego de  $1,0E+08$  o valor total é de R\$ 3.663.223 (aumento de 14,2%). Para as estruturas de pavimento asfáltico dimensionadas com o método MeDiNa, com asfalto tipo HiMA, por exemplo, a diferença entre os custos para essas condições de tráfego é consideravelmente maior: 53,2%.

### ***3.1.3 Análise orçamentária – comparações entre pavimentos asfálticos e em concreto de cimento Portland***

De modo a ter uma visão ampla dos preços estimados para as diferentes soluções, possibilitando a comparação das alternativas, a Figura 18 apresenta os valores totais estimados para implantação de 1 km das estruturas orçadas com pavimentação asfáltica e em CCP.

Figura 18 – Estimativas dos valores de implantação para as estruturas de pavimento asfáltico e em concreto de cimento Portland



A Figura 18 demonstra que, para condições de tráfego igual ou inferior a 5,0E+07, as estruturas de pavimentos asfálticos (independentemente do tipo de ligante asfáltico ou método de dimensionamento) apresentam os menores preços estimados em comparação às estruturas de pavimento em CCP.

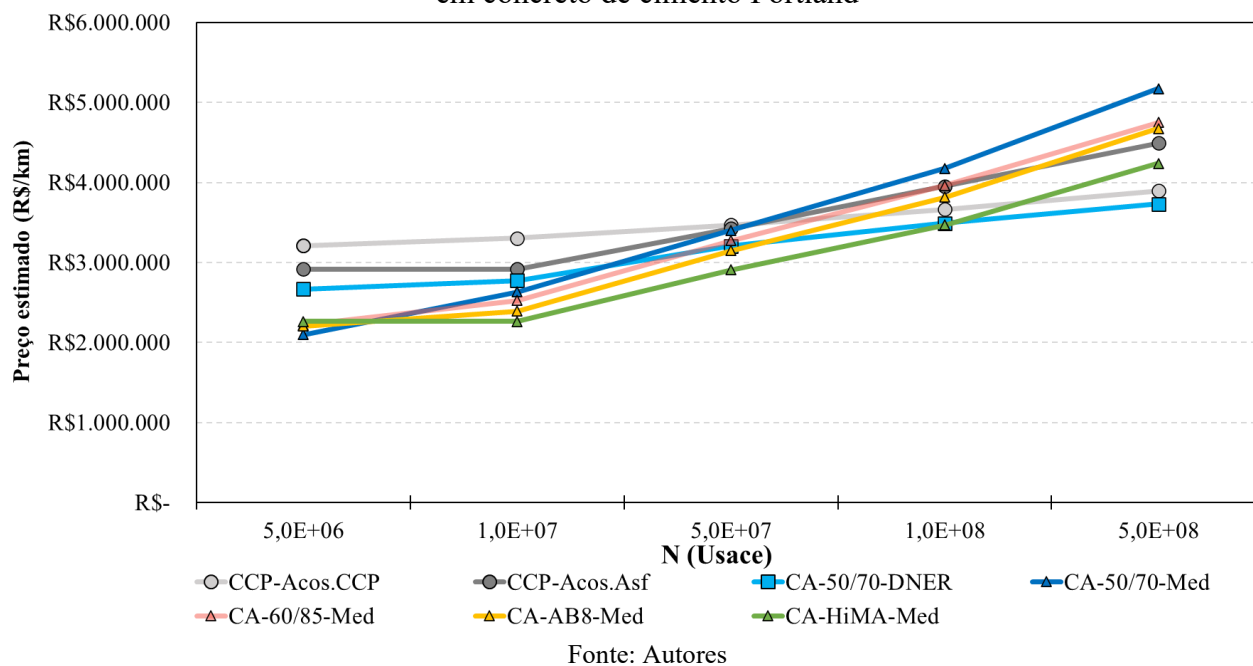
Desconsiderando as misturas com CAP 50/70, que, conforme visto anteriormente, possivelmente não atenderiam aos parâmetros de desempenho à deformação permanente (em condições de tráfegos superiores a 1,0E+07), para o tráfego de 1,0E+08, a solução menos onerosa na etapa de implantação é aquela com revestimento asfáltico com HiMA. Observa-se, também, para este nível de tráfego, que as alternativas com AMP 60/85 e AB-08 apresentam maiores valores em comparação ao pavimento rígido com acostamento em CCP. Já para o tráfego de 5,0E+08, o pavimento rígido é a solução de implantação com maior viabilidade econômica dentre todas as alternativas pesquisadas e com viabilidade técnica de ser implementada até esta etapa do estudo.

Para as premissas consideradas no presente estudo, observam-se aumentos praticamente lineares nos valores estimados das estruturas de CCP em função do tráfego (Figura 19). Comparando a solução em pavimento rígido (com acostamento em CCP) com as soluções de pavimento asfáltico, percebe-se na Figura 19 que, de maneira geral, a partir do tráfego de 1,0E+08 ocorre uma tendência de inversão dos maiores preços finais estimados, indicando a viabilidade econômica do pavimento



rígido em comparação às soluções de pavimentos asfálticos (desconsiderando, por motivos já apontados, a utilização de CAP 50/70 para esses níveis de tráfego).

Figura 19 – Comportamento dos valores de implantação para as estruturas de pavimento asfáltico e em concreto de cimento Portland



Com o intuito de permitir ao leitor um maior aprofundamento, e possibilitar ao estudo uma maior investigação quanto à sensibilidade dos custos de implantação frente a outros aspectos complementares ao dimensionamento de pavimentos e tipos estruturais das vias, serão apresentadas, a seguir, algumas avaliações complementares.

### 3.1.4 Análise orçamentária – avaliações complementares

Nesta etapa do trabalho, serão avaliados os impactos sobre os custos de implantação oriundos da sensibilidade do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos; do comportamento semirrígido (invertido ou não) de pavimentos; além do peso sobre os custos totais dos ligantes asfálticos e do CP, bem como a influência de consumos destes aglutinantes nas composições de custos unitários.

#### **3.1.4.1 Estruturas dimensionadas com o FlexPAVE™ e estruturas semirrígidas**

Considerando os resultados obtidos para os pavimentos rígidos e pavimentos asfálticos (com o método do DNER e MeDiNa), foram realizadas análises complementares utilizando o *software* FlexPAVE™ (para o tráfego de  $5,0E+07$  e  $1,0E+08$  – considerando uma mistura com asfalto AMP 60/85), e soluções em pavimento semirrígido (para tráfego de  $1,0E+08$  e  $5,0E+08$ ).

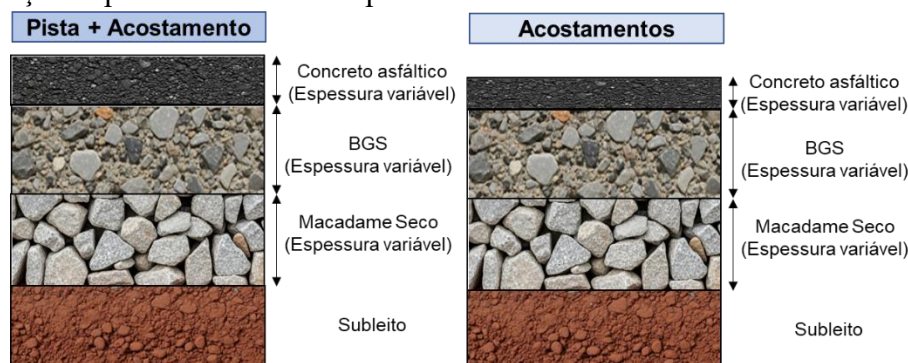
O FlexPAVE™ é um software que possui o mesmo propósito do MeDiNa de dimensionamento de pavimentos asfálticos. No entanto, a avaliação dos esforços internos na estrutura considera, além da sazonalidade anual e diária da temperatura, a viscoelasticidade das misturas asfálticas, permitindo considerar, no dimensionamento de pavimentos, além do clima local, a velocidade dos veículos. Ademais, para a caracterização dos materiais asfálticos, o protocolo de ensaios de rigidez e dano por fadiga é mais complexo, demandando uma varredura destas propriedades em distintas temperaturas e frequências de aplicação de carga.

O FlexPAVE™ foi produzido na NCSU em Raleigh, no Estado da Carolina do Norte, nos Estados Unidos sob fomento da *Federal Highway Administration* (FHWA). Maiores informações sobre a teoria da viscoelasticidade empregada pelo método e seus desdobramentos podem ser encontrados, de maneira pormenorizada, em Nascimento (2015). Nesta mesma tese de doutorado, seu autor apresentou um modelo de calibração, campo laboratório, de propósito idêntico àquele constante no MeDiNa, que transforma o dano calculado computacionalmente em área trincada por fadiga no pavimento asfáltico (obtido a partir de inúmeros segmentos experimentais monitorados no Brasil).

Em tempo, ressalta-se que a avaliação laboratorial de rigidez (Módulo Complexo) e dano por fadiga (ensaio de fadiga por tração-compressão axial) empregado no FlexPAVE™ permitem, com maior sensibilidade, considerar as reais potencialidades das misturas asfálticas modificadas sobre o dimensionamento estrutural dos pavimentos com elas constituídos.

Na Figura 20 e na Tabela 43 são apresentadas as seções-tipo das estruturas e a síntese do dimensionamento realizado com o FlexPAVE™.

Figura 20 – Seções tipo das estruturas de pavimentos asfálticos dimensionadas com o FlexPAVE™



Fonte: Autores

Tabela 43 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos pavimentos asfálticos dimensionados com o FlexPAVE™

N <sub>USACE</sub> (Pista)	Desempenho do Pavimento	Revestimento pista		Revestimento acostamento		Base	Sub-base
	%AT	Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	h <sub>BGS</sub> (cm)	h <sub>MS</sub> (cm)
5x10 <sup>7</sup>	29,7%	AMP 60/85	8,5	CAP 50/70	5,0	15	15
10 <sup>8</sup>	24,1%	AMP 60/85	10,5	AMP 60/85	5,5	15	20

Fonte: Autores

Da Tabela 43, depreende-se que o emprego do FlexPAVE™, em igualdade de condições com as consideradas no MeDiNa, desde as camadas de subleito, sub-base e base, modificando apenas a forma de avaliação das propriedades de rigidez e dano por fadiga da mistura asfáltica, possibilitou a redução da espessura do revestimento asfáltico em 3 cm e 2,5 cm, para os tráfegos de 5E+07 e 1E+08, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 43.

Outro aspecto importante e que merece ser melhor avaliado neste estudo advém da sensibilidade, que é senso comum aos projetistas que empregam a mecânica de pavimentos para a concepção estrutura de pavimentos, de que o aumento das espessuras das camadas granulares, em um pavimento de comportamento flexível, pouco ou nenhuma influência traz para a redução da espessura das camadas asfálticas, quando considerado o efeito da fadiga no revestimento do pavimento. Dessa maneira, decidiu-se por avaliar o efeito da adoção de pavimentos de comportamento semirrígido, invertido ou não, sobre os custos de implantação.

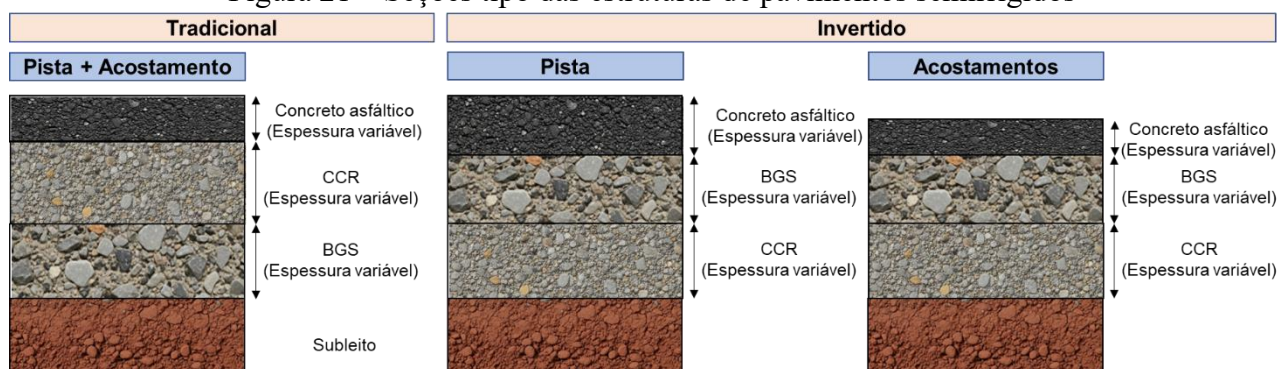
O aumento da rigidez da camada de base, como o emprego de uma camada cimentada (CCR no caso do presente estudo) para pavimentos semirrígidos ou na camada de sub-base, para o caso de pavimentos semirrígidos invertidos, reduz a deformabilidade do pavimento como um todo, expondo

o revestimento a esforços de tração na flexão substancialmente menores quando comparados à condição sem a presença de material cimentado na base ou sub-base. Com esforços de tração menores acometendo o revestimento, a fadiga na mistura asfáltica passa a ocorrer de maneira menos veloz. Contudo, deve-se, impreterivelmente, avaliar também o efeito da fadiga na camada cimentada que, em inúmeros casos, acaba alcançando a degradação por este fenômeno antes da camada asfáltica.

Diante do que fora mencionado, empregou-se o sistema MeDiNa, que se encontra preparado, no que diz respeito ao seu algoritmo, para o dimensionamento de pavimentos semirrígidos. Como material cimentado, optou-se pelo emprego do CCR, material estudado pelo Prof. Glicério Trichês em sua tese de doutorado, com um consumo de CP de 200 kg/m<sup>3</sup>.

Na Figura 21 e na Tabela 44 são apresentadas as seções-tipo e a síntese do dimensionamento das estruturas semirrígidas.

Figura 21 – Seções tipo das estruturas de pavimentos semirrígidos



Fonte: Autores

Tabela 44 – Síntese do Dimensionamento Estrutural dos pavimentos semirrígidos

Tipo	N <sub>USACE</sub> (Pista)	Revestimento pista		Revestimento acostamento		BGS	CCR
		Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	Tipo de Ligante	h <sub>CA</sub> (cm)	h <sub>BGS</sub> (cm)	h <sub>CCR</sub> (cm)
SR-HiMA	10 <sup>8</sup>	HiMA	5,0	HiMA	5,0	12,0	17,0
SR-INV-HiMA	10 <sup>8</sup>	HiMA	10,0	HiMA	5,0	10,0	12,0
SR-HiMA	5x10 <sup>8</sup>	HiMA	5,0	HiMA	5,5	12,0	18,0
SR-INV-HiMA	5x10 <sup>8</sup>	HiMA	10,0	HiMA	5,0	15,0	12,0

Fonte: Autores

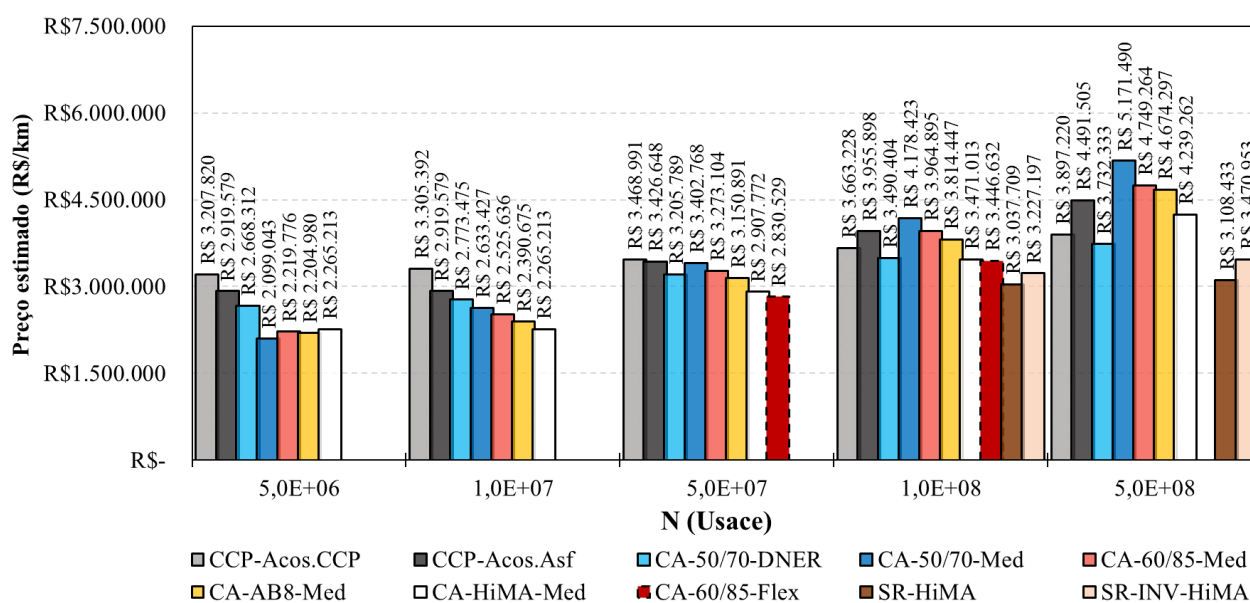
Nas estruturas semirrígidas, apresentadas na Tabela 44, optou-se por trabalhar com revestimentos com ligantes asfálticos HiMA. Para o tráfego mais alto avaliado, a área trincada do CA na alternativa invertida ficou em 30%, enquanto no semirrígido normal ficou em 1%. O consumo de

resistência à fadiga do CCR foi estimado em torno de 41% para ambos os casos. Para o tráfego de 1E+08, a área trincada do CA no sistema semirrígido invertido ficou em 5,4%, enquanto no semirrígido normal ficou em 0,6%. O consumo de resistência à fadiga do CCR foi estimado em torno de 44% para ambas as estruturas semirrígidas.

Apesar de estar preparado para a avaliação estrutural de pavimentos semirrígidos, o MeDiNa, conforme já mencionado, em sua base de dados de segmentos de vias monitoradas em campo, não considerou pavimentos com materiais cimentados em suas camadas estruturais.

De modo a ter uma visão ampla dos custos de cada alternativa, a Figura 22 apresenta os preços totais estimados para a implantação de 1 km das estruturas orçadas com pavimentação asfáltica e em concreto de CP, incluindo também as alternativas simuladas no FlexPAVE™ e os pavimentos semirrígidos.

Figura 22 – Estimativas dos valores de implantação para as estruturas de pavimento considerando pavimentos asfálticos, rígidos e semirrígidos



Fonte: Autores

Conforme pode-se observar na Figura 22, as estruturas dimensionadas com o *software* FlexPAVE™ (com CA-60/85) resultam em menores valores estimados em comparação às simulações realizadas no MeDiNa para a mistura com o mesmo tipo de ligante asfáltico (diferença de aproximadamente 13%). As diferenças ocorrem em função do FlexPAVE™ demandar menores espessuras de revestimento asfáltico em comparação às estruturas simuladas no MeDiNa. Ainda, os

valores estimados com base no FlexPAVE™ (CA-60/85), para tráfegos de 5,0E+07 e 1,0E+08, indicam valores semelhantes às estruturas com asfalto HiMA dimensionadas pelo MeDiNa. Tais resultados reforçam a competitividade dos ligantes asfálticos modificados, sobretudo com métodos de dimensionamento que são capazes de considerar, adequadamente, os benefícios dos asfaltos modificados, como é o caso do MeDiNa e, principalmente, do FlexPAVE™.

Para as estruturas de pavimentos semirrígidos, verifica-se na Figura 22 que as soluções de pavimento semirrígido invertido (sub-base cimentada) apresentam maiores preços estimados em relação ao semirrígido convencional (base cimentada). Os valores estimados para os pavimentos semirrígidos, nas condições de tráfego de 1,0E+08 e 5,0E+08, indicam que essas estruturas apresentam os menores preços estimados em comparação às demais soluções: pavimentos asfálticos e rígidos.

Este estudo evidenciou a necessidade de o meio técnico-científico ampliar os estudos aplicados com o emprego de bases e/ou sub-bases mais rígidas a fim de garantir maior economicidade na infraestrutura viária. Assim como as bases cimentadas, maiores pesquisas também deveriam ser fomentadas para o emprego de bases asfálticas, prática muito difundida em outros países e com raros casos de aplicação no Brasil.

Considerando a prática atual predominante no país, projetos de pavimentos rígidos utilizando acostamentos em CCP, e as recomendações de não utilização de CAP 50/70 para tráfegos maiores que 1,0E+07, são apresentadas na Tabela 45 as diferenças percentuais dos preços estimados de pavimentos asfálticos e semirrígidos em relação aos pavimentos rígidos (com acostamento em CCP).

Tabela 45 – Síntese das diferenças aproximadas dos preços estimados em relação aos pavimentos rígidos com acostamento em CCP

N <sub>USACE</sub>	CA-50/70-DNER	CA-50/70-Med	CA-60/85-Med	CA-AB8-Med	CA-HiMA-Med	CA-60/85-Flex	SR-HiMA	SR-INV-HiMA
5x10 <sup>6</sup>	-17%	-35%	-31%	-31%	-29%	-	-	-
10 <sup>7</sup>	-16%	-20%	-24%	-28%	-31%	-	-	-
5x10 <sup>7</sup>	-	-	-6%	-9%	-16%	-18%	-	-
10 <sup>8</sup>	-	-	+8%	+4%	-5%	-6%	-17%	-12%
5x10 <sup>8</sup>	-	-	+22%	+20%	+9%	-	-20%	-11%

Nota: Desconsiderando a utilização de CAP 50/70 para tráfegos maiores que 10<sup>7</sup>.

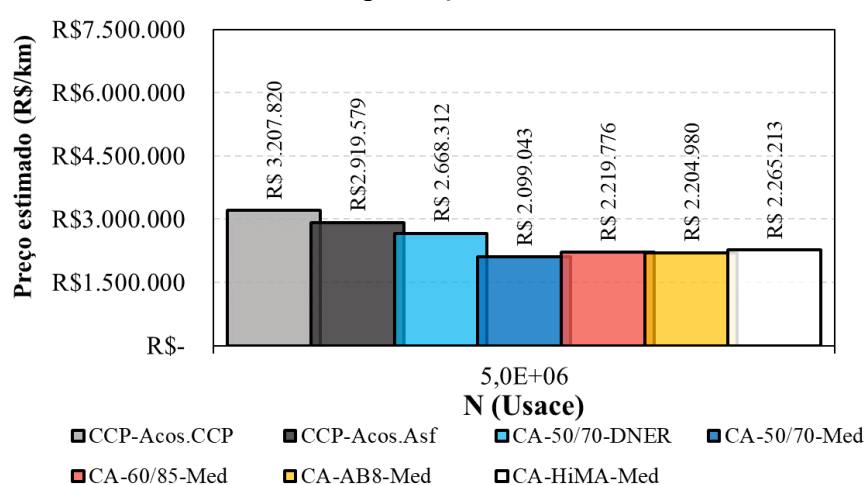
Fonte: Autores

Analisando os dados da Figura 22 e Tabela 45, que sumarizam os resultados acerca dos custos de implantação, observa-se que, para as condições avaliadas sob o tráfego de 5,0E+06 (Figura 23), as estruturas com pavimentos asfálticos apresentam os menores preços totais estimados de construção



em comparação ao pavimento rígido com acostamento em CCP. O preço estimado para a implantação de 1 km de pavimento de concreto foi de R\$ 3.207.820, aproximadamente 35% superior ao pavimento asfáltico com CAP 50/70 dimensionado pelo método MeDiNa (R\$ 2.099.043), e 17% superior à alternativa com CAP 50/70 considerando o método DNER (R\$ 2.668.312). Dessa forma, considerando a etapa de construção e as premissas do presente estudo, pode-se verificar que, para esse nível de tráfego, os pavimentos asfálticos apresentam-se mais vantajosos do ponto de vista financeiro.

Figura 23 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas –  $N_{USACE}$  de  $5,0E+06$

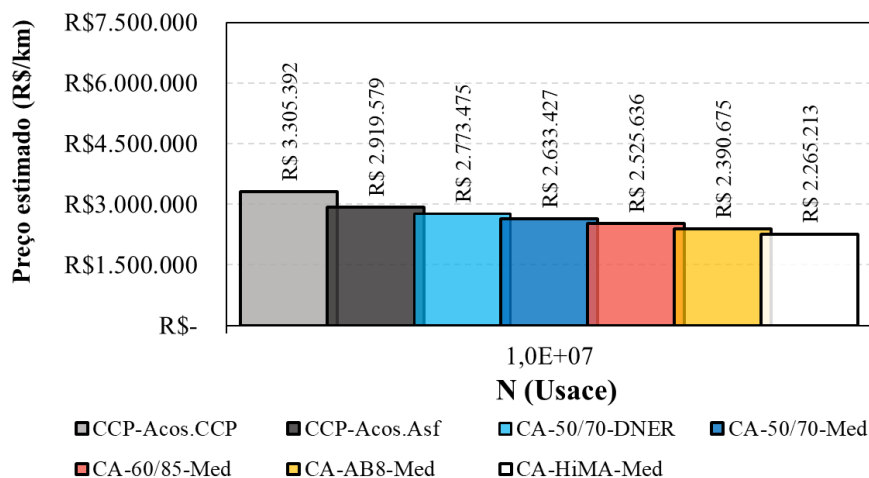


Fonte: Autores

Para o tráfego  $N_{USACE}=1,0E+07$  (Figura 24), o valor estimado para a implantação de 1 km em pavimento rígido, sempre considerando a tendência do DNIT de aplicação com acostamento em CCP, foi de R\$ 3.305.392, superior aos valores estimados para as alternativas em pavimento asfáltico (diferenças entre 16% e 31%). O valor da estrutura de pavimento rígido com acostamento em CCP é aproximadamente 31% superior à estrutura de pavimento asfáltico com asfalto HiMA dimensionada pelo método MeDiNa (R\$ 2.265.213). Assim como ocorreu para o tráfego de  $5,0E+06$ , considerando a etapa de construção e as premissas do presente estudo, pode-se verificar que, para esse nível de tráfego, os pavimentos asfálticos continuam apresentando-se mais vantajosos do ponto de vista financeiro. Ainda, os resultados demonstram as vantagens econômicas da utilização de ligantes modificados, propiciando reduções de custos expressivos em função do melhor desempenho e consequente redução das espessuras dos revestimentos asfálticos.



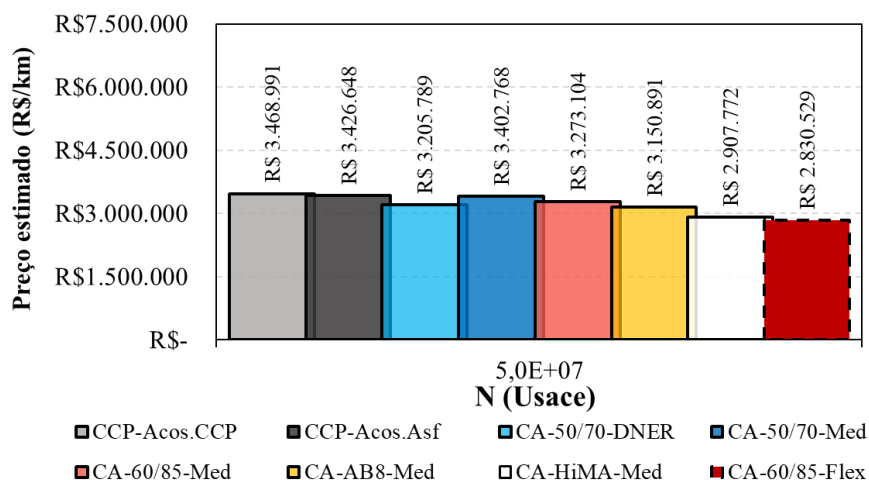
Figura 24 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas –  $N_{USACE}$  de  $1,0E+07$



Fonte: Autores

Ao considerar um tráfego  $N_{USACE}=5,0E+07$  (Figura 25), as diferenças dos valores estimados entre o pavimento rígido e os pavimentos asfálticos são menores, na ordem de 6% a 18% maior para a estrutura de pavimento de CCP. Para as alternativas de pavimentos asfálticos dimensionadas pelo método MeDiNa, a alternativa menos onerosa é que utilizou asfalto do tipo HiMA (R\$ 2.907.772), aproximadamente 16% menor que a estrutura com pavimento rígido com acostamento em CCP (R\$ 3.468.991). A estrutura com menor preço final para este nível de tráfego foi a dimensionada com o software FlexPAVE<sup>TM</sup>, que empregou o asfalto modificado AMP 60/85 (R\$ 2.830.529), com valor 18% menor que a estrutura de pavimento rígido com acostamento em CCP.

Figura 25 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas –  $N_{USACE}$  de  $5,0E+07$



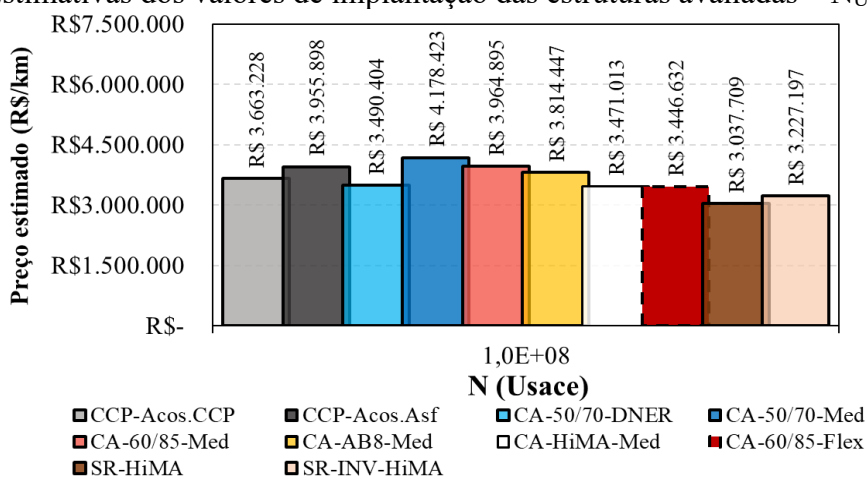
Fonte: Autores

Diante disso, observa-se que, considerando a etapa de construção e as premissas do presente estudo, nesse nível de tráfego ( $5,0E+07$ ), os pavimentos asfálticos com ligantes modificados apresentam menores valores estimados em comparação ao pavimento rígido; todavia, as diferenças são menores que o observado para os níveis de tráfego mais baixos já abordados anteriormente.

Cabe frisar que o presente estudo assumiu para as estruturas de pavimento de CCP uma sub-base granular de BGS de 10 cm, antes da base em CCR (Vide Seção 4.3.2). Conforme demonstrado na revisão bibliográfica deste relatório (Seção 3.3), alguns projetos realizados no país não consideram essa camada de BGS antes da camada de CCR. Caso fosse desconsiderado o emprego da BGS, os preços estimados seriam semelhantes para as estruturas de pavimentos asfálticos e rígidos para esse nível de tráfego ( $5,0E+07$ )<sup>47</sup>. Contudo, reforça-se a opinião dos autores deste estudo, em convergência à prática construtiva adotada até pouco tempo, inclusive descrita em Balbo (2009), sobre a importância de considerar o emprego de sub-base granular para, entre outras coisas, prover capacidade drenante ao pavimento.

À medida que o tráfego aumenta, para  $N_{USACE}=1,0E+08$  (Figura 26), visualiza-se uma tendência de maior proximidade entre os valores estimados para o pavimento rígido e pavimentos asfálticos. As estruturas de pavimento asfáltico com AMP 60/85 (R\$ 3.964.895) e Asfalto Borracha AB-08 (R\$ 3.814.447), dimensionados pelo MeDiNa, apresentam valores superiores em aproximadamente 8% e 4%, respectivamente, em relação ao pavimento rígido com acostamento em CCP (R\$ 3.663.228).

Figura 26 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas –  $N_{USACE}$  de  $1,0E+08$



<sup>47</sup> A desconsideração da camada de BGS para o pavimento rígido (com acostamento em CCP) ocasionaria uma redução do valor estimado desta estrutura para R\$ 2.975.135 - tráfego de  $5,0E+07$ .

Já o pavimento asfáltico com HiMA (R\$ 3.471.013) apresenta valor aproximadamente 5% inferior em relação ao pavimento rígido. A estrutura de pavimento asfáltico com menor preço final para este nível de tráfego foi a dimensionada com o software FlexPAVE™, simulado com o emprego de asfalto modificado AMP 60/85 (R\$ 3.446.632), com valor 6% menor ao da estrutura de pavimento rígido. Os resultados demonstram que a utilização de ligantes modificados de elevado desempenho podem viabilizar a utilização de pavimentos asfálticos em níveis de tráfego extremamente pesados.

A análise complementar das estruturas semirrígidas indica que essas alternativas representam os menores valores estimados dentre todas as alternativas simuladas, ficando até 17% mais econômicas que a estrutura de pavimento rígido com acostamento em CCP para o tráfego de 1,0E+08 (R\$ 3.037.709 para a estrutura semirrígida e R\$ 3.663.228 para estrutura em CCP).

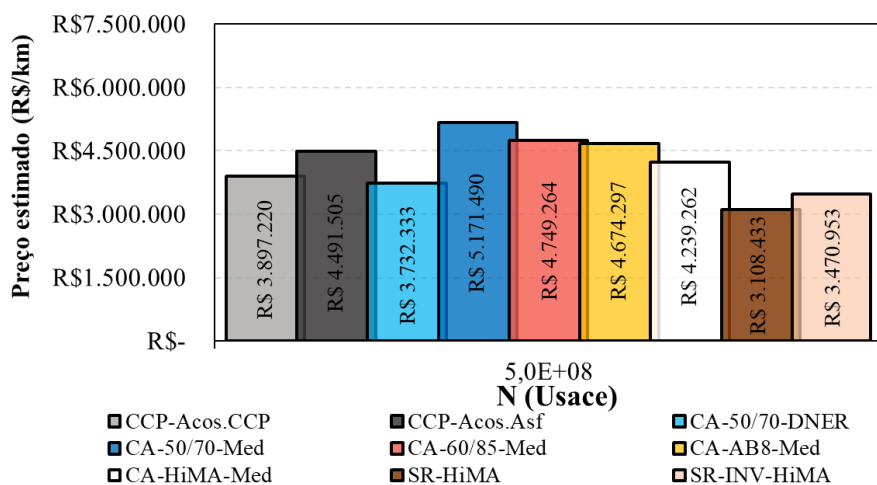
Em que pese a ressalva já realizada (inúmeras vezes neste trabalho), para o emprego de pavimentos de CCP sem uma sub-base granular, caso fosse desconsiderada a camada de BGS, nesse nível de tráfego (1,0E+08), as estruturas em pavimento rígido com acostamento em CCP seriam mais vantajosas economicamente do que as alternativas com pavimentos asfálticos (inclusive com HiMA)<sup>48</sup>.

Na condição de tráfego mais extrema avaliada neste estudo,  $N_{USACE}=5,0E+08$  (Figura 27), as alternativas de pavimentos asfálticos flexíveis (sem bases cimentadas) apresentam maiores valores estimados de implantação em comparação ao pavimento rígido com acostamento em CCP (R\$ 3.897.220), na ordem de 9% (com HiMA - R\$ 4.239.262) a 22% (com AMP 60/85 - R\$ 4.749.264). Assim, nesse nível de tráfego, para as premissas adotadas no presente estudo, o pavimento rígido seria mais viável em comparação aos pavimentos asfálticos do ponto de vista financeiro.

Entretanto, assim como ocorreu para o tráfego de 1,0E+08, as estruturas de pavimentos semirrígidas apresentaram os menores valores estimados dentre as soluções analisadas para 5,0E+08, sendo aproximadamente 20% menor que a estrutura de pavimento rígido com acostamento em CCP (R\$ 3.108.433 para a estrutura semirrígida e R\$ 3.897.220 para estrutura em CCP). Em tempo, também deve-se mencionar que o tráfego de 5,0E+08 é extremamente alto, o que provavelmente excederia a capacidade da via, isto é, que a via não teria capacidade de permitir o tráfego de um número tão elevado de veículos comerciais em uma única faixa de rolagem ao longo de 25 anos. Na pesquisa de projetos realizada, não foi observado um projeto para um tráfego tão elevado.

<sup>48</sup> A desconsideração da camada de BGS para o pavimento rígido (com acostamento em CCP) ocasionaria uma redução do valor estimado desta estrutura para R\$ 3.169.372 - tráfego de 1,0E+08.

Figura 27 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas – NUSACE de 5,0E+08



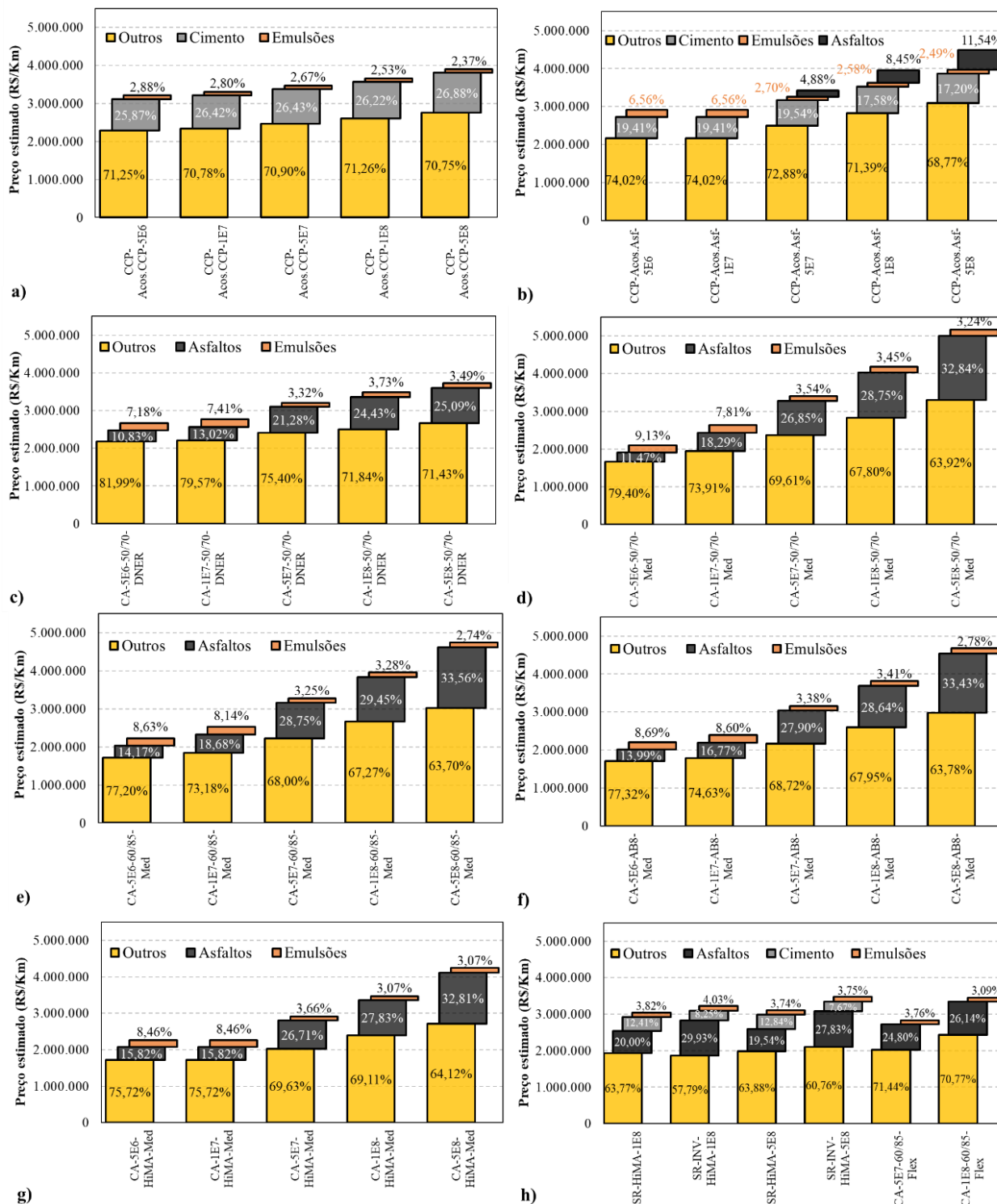
Fonte: Autores

Importante destacar, novamente, que as análises representam os materiais e condições simuladas. Entretanto, conforme já abordado na metodologia, tratam-se de misturas asfálticas com comportamento mediano, buscando representar materiais usualmente utilizados em obras no país, de amplo conhecimento pelas empresas executoras, concessionárias e órgãos públicos. Desse modo, especialmente para condições de tráfegos elevados, ainda poderiam ser consideradas misturas especiais, como *Gap Graded* ou *Stone Matrix Asphalt*, por exemplo, com potencial ganho de desempenho e possibilidade de redução de custos.

### 3.1.4.2 Proporção dos custos dos insumos relevantes

Em virtude da relevância dos materiais asfálticos e do CP nos custos das obras de pavimentação, os percentuais desses insumos em relação aos valores totais estimados são apresentados na Figura 28, para todas as condições avaliadas. Os valores dos insumos referem-se aos custos de aquisição e de seu transporte, acrescido do BDI. Conforme pode-se observar na Figura 28, os materiais asfálticos e o CP representam uma parcela significativa nos preços estimados por km. Os resultados demonstram os percentuais relacionados aos valores dos: (i) Asfaltos; (ii) Emulsões; (iii) Cimento Portland; e (iv) Outros (demais insumos e serviços).

Figura 28 – Proporção do custo dos insumos em relação a preço estimado de 1 km de implantação das estruturas: a) CCP-Acos.CCP; b) CCP-Acos.Asf.; c) CA-50/70-DNER; d) CA-50/70-Med; e) CA-60/85-Med; f) CA-AB8-Med; g) CA-HiMA-Med; h) SR e CA-60/85-Flex



Fonte: Autores

Para as estruturas de pavimento de concreto, com acostamento em CCP, o CP representa entre 25,87% e 26,88% do preço total estimado por km, demonstrando pequena variação à medida que o tráfego aumenta. Nas estruturas de pavimento rígido com acostamento asfáltico, esses percentuais variam entre 17,2% e 19,41%. Os percentuais relacionados às emulsões<sup>49</sup> são pequenos para as soluções com pavimento rígido nos acostamentos (na ordem de 2,4% a 2,9%) e maiores para soluções com TSD no acostamento (tráfegos até  $N_{USACE}=1,0E+07$ ). O asfalto CAP 50/70 utilizado nos pavimentos rígidos com acostamento em pavimento asfáltico ( $N_{USACE}$  superior a  $1,0E+07$ ) representa percentuais entre 4,88% a 11,54%.

Para estruturas de pavimentos asfálticos com CAP 50/70, dimensionadas pelo método do DNER, os asfaltos utilizados na composição das misturas representam percentuais entre 10,83% e 25,09% do valor total estimado para 1 km de implantação. Para tráfegos de até  $N_{USACE}=1,0E+07$ , o percentual relacionado ao CAP 50/70 é de até 13,02%, com as emulsões representando entre 7,18% e 7,41%, em função da utilização de TSD nos acostamentos nesses níveis de tráfego. Para tráfegos acima de  $N_{USACE}=1,0E+07$ , os percentuais relacionados aos asfaltos têm um aumento importante (até 25,09%). Contudo, cabe destacar que o CAP 50/70 não é recomendado para esses níveis de tráfego.

Os valores relacionados ao asfalto CAP 50/70, utilizado nas estruturas dimensionadas pelo MeDiNa, representam percentuais entre 11,47 e 32,84% do preço total estimado para a implantação de 1 km. Para tráfegos de até  $N_{USACE}=1,0E+07$ , os percentuais são de até 18,29%, superiores aos valores observados para as estruturas dimensionadas pelo método DNER. Tal situação decorre do fato de as estruturas dimensionadas pelo MeDiNa apresentarem menores espessuras de camadas granulares em comparação às dimensionadas pelo DNER. A utilização de TSD nos acostamentos, para tráfegos até  $N_{USACE}=1,0E+07$ , induz maior representatividade das emulsões (entre 9,13 e 7,81% do preço total estimado).

As estruturas dimensionadas pelo método MeDiNa, considerando ligantes modificados (AMP 60/85, AB-08 e HiMA), apresentam resultados semelhantes em relação aos percentuais de contribuição dos asfaltos e emulsões nos preços finais das estruturas dimensionadas. Para as soluções com asfalto AMP 60/85, o ligante asfáltico representa percentuais entre 14,17 e 33,56%; enquanto o AB-08 representa entre 13,99% e 33,43%; e o HiMA, percentuais entre 15,82% e 32,81%.

Em relação às análises complementares, para as condições avaliadas com o FlexPAVE<sup>TM</sup>, utilizando AMP 60/85, os custos relacionados aos ligantes asfálticos representam menores

<sup>49</sup> Vide Tabela 39 onde demonstram-se as taxas e locais de aplicação das emulsões.

percentuais em comparação às soluções dimensionadas pelo MeDiNa, para as mesmas condições de tráfego e mistura asfáltica. Para as estruturas semirrígidas, os ligantes asfálticos representam maior percentual de custo em comparação ao CP necessário para a produção do CCR.

### 3.1.4.3 Análise de sensibilidade sobre os custos – consumos de ligantes asfálticos e de cimento Portland

Considerando que, em muitos estudos disponíveis na literatura, as comparações dos preços estimados para as diferentes soluções de pavimentação utilizam os consumos de ligantes asfálticos e de CP indicados nas composições do SICRO, sem ajustes, os preços estimados de implantação das estruturas foram recalculados utilizando os consumos originais das composições do SICRO, conforme demonstrado na Tabela 46 e Tabela 47.

Tabela 46 – Parâmetros adotados na análise de sensibilidade – composições com cimento Portland

Material	Consumo cimento (kg/m³)	
	Orç. Ref.	SICRO
Concreto Compactado com Rolo (pavimento de CCP)	120	100
Concreto Compactado com Rolo (pavimentos semirrígidos)	200	100
Concreto de Cimento Portland	392,7	350

Fonte: Autores

Tabela 47 – Parâmetros adotados na análise de sensibilidade – composições com ligante asfáltico

Material	Massa específica compactada (t/m³)		Teor de Ligante (%)	
	Orç. Ref.	SICRO	Orç. Ref.	SICRO
Concreto asfáltico com CAP 50/70	2,328	2,4	4,93	5,545
Concreto asfáltico com AMP 60/85	2,532	2,4	4,83	6,000
Concreto asfáltico com Asfalto borracha	2,215	2,4	6,76	6,000
Concreto asfáltico com HiMA	2,445	2,4	4,60	6,000 <sup>1</sup>

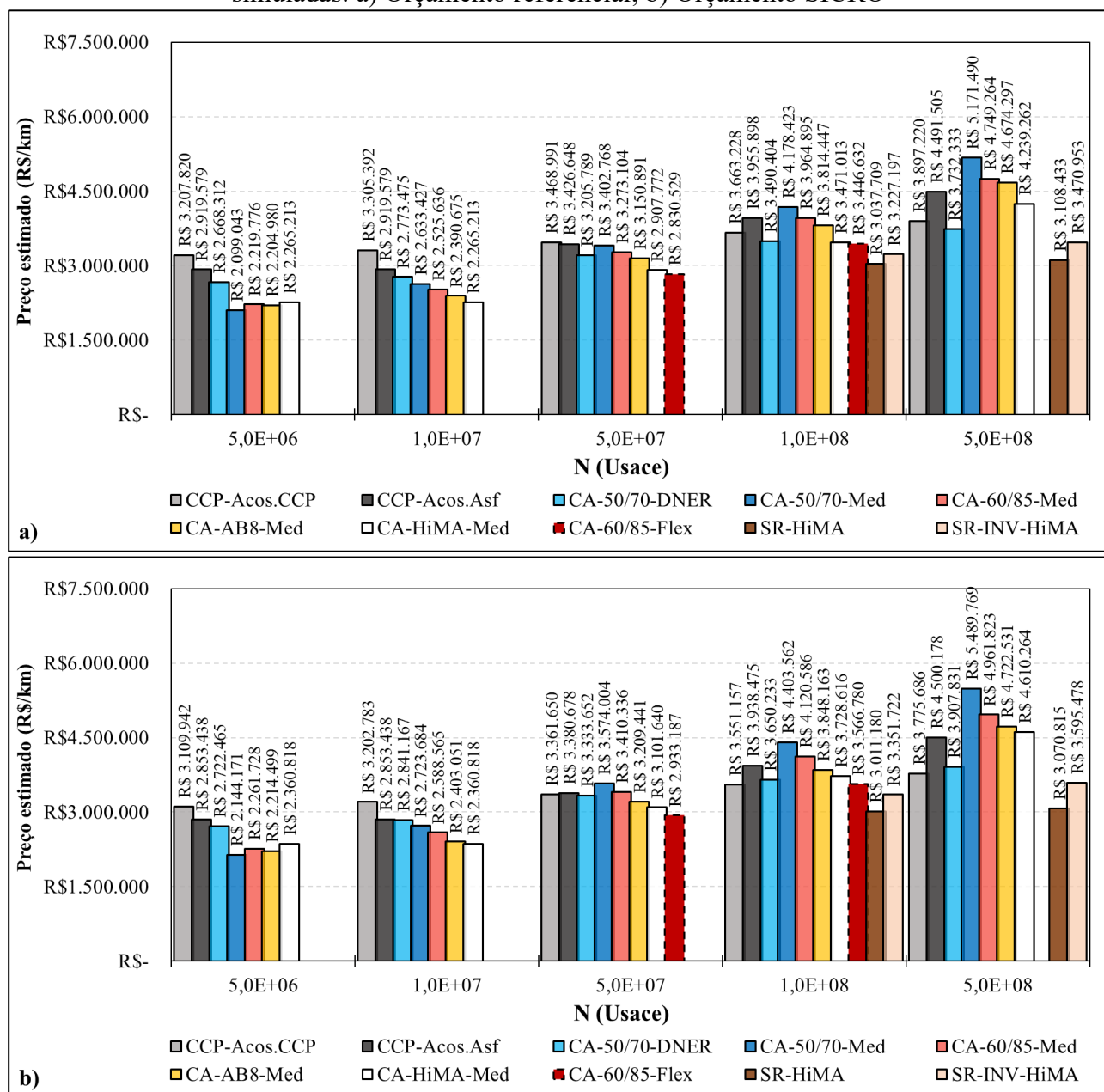
Nota 1 – Não há composição no SICRO para misturas com HiMA – valor de referência de concreto asfáltico com polímero.

Fonte: Autores

Com base nesses ajustes, são apresentados, na Figura 29, os preços estimados para as estruturas: (a) considerando as premissas adotadas no presente estudo, com os ajustes nos consumos, conforme já demonstrado no decorrer do relatório (Orçamento referencial); e (b) adotando os consumos de ligante asfáltico e CP indicados nas composições do SICRO (Orçamento SICRO).



Figura 29 – Estimativas dos valores de implantação das estruturas avaliadas – todas as alternativas simuladas: a) Orçamento referencial; b) Orçamento SICRO



Fonte: Autores

Conforme pode-se visualizar na Figura 29, a utilização dos consumos indicados nas composições do SICRO (Figura 29b), sem ajustes, ocasiona o aumento dos preços estimados por km para os pavimentos asfálticos e a redução para os pavimentos em CCP, em comparação ao orçamento referencial (com ajustes nos consumos - Figura 29a). Tal situação ocorre especialmente em função dos maiores consumos de ligante asfáltico e também menores consumos de CP indicados no SICRO.

Assim como para o orçamento referencial deste trabalho, ao assumir os consumos do SICRO, sem ajustes, nas condições de tráfego de  $N_{USACE}=5,0E+06$  e  $1,0E+07$ , os pavimentos asfálticos (independentemente do tipo de ligante ou método de dimensionamento) apresentam os menores preços estimados por km em comparação aos pavimentos rígidos, indicando maior viabilidade do ponto de vista financeiro (Figura 29b).

Para o tráfego  $N_{USACE}=5,0E+07$ , a alteração dos consumos ocasiona maior impacto nos resultados. Para o orçamento referencial (Figura 29a), considerando os ajustes dos consumos, todas as estruturas com pavimentos asfálticos que utilizam ligantes modificados apresentaram menores valores estimados em comparação aos pavimentos rígidos. Ao adotar os consumos do SICRO (Figura 29b), a estrutura com AMP 60/85 dimensionada pelo MeDiNa apresenta maior valor estimado em comparação aos pavimentos rígidos. Todavia, as demais estruturas com ligantes modificados ainda seriam mais vantajosas do ponto de vista financeiro que as estruturas em pavimento rígido, mesmo considerando os consumos do SICRO.

Na condição de tráfego de  $N_{USACE}=1,0E+08$ , ocorre uma mudança mais importante ao considerar os consumos indicados no SICRO. Para esse nível de tráfego, comparando pavimentos rígidos e asfálticos, ao adotar os consumos do SICRO, a solução mais viável do ponto de vista financeiro passa a ser a alternativa de pavimento rígido com acostamento em CCP, enquanto que, para os orçamentos com consumos reais, as estruturas com HiMA e AMP 60/85 (dimensionada com FlexPAVE<sup>TM</sup>) eram as mais econômicas. Para quaisquer cenários de consumos, as soluções em pavimento semirrígido são as que apresentaram os menores valores estimados de implantação.

Já na condição de tráfego de  $N_{USACE}=5,0E+08$ , o pavimento rígido com acostamento em CCP é a alternativa mais viável do ponto de vista financeiro quando comparada com as soluções de pavimentos asfálticos, independentemente dos valores de consumo adotados. Assim como para o tráfego  $N_{USACE}=1,0E+08$ , para os distintos cenários de consumos, as soluções em pavimento semirrígido são as que apresentaram os menores valores estimados de implantação.

Nesse sentido, é importante frisar novamente que, na fase orçamentária, tem-se um preço estimado para a obra, sendo o preço final conhecido somente com as informações dos consumos efetivamente utilizados em campo. Em obras públicas, adotam-se consumos estimados de ligante asfáltico na fase orçamentária. Contudo, durante a execução, remunera-se o teor efetivamente utilizado na obra. Muitas vezes os consumos indicados no SICRO podem não representar adequadamente os valores utilizados em determinada obra (o que do ponto de vista para elaboração

do orçamento não é problema, mas para fins comparativos pode representar uma vantagem em prol de uma alternativa, como ocorrera neste estudo).

Em tempo, conforme também já foi destacado neste documento, o SICRO não é uma tabela rígida, mas sim um sistema de referência de custos para obras rodoviárias que deve ser ajustado pelo orçamentista conforme as particularidades de cada projeto. Diante disso, recomenda-se que estudos de viabilidade econômica de implantação das diferentes alternativas de pavimentação considerem ajustes nos consumos das composições de custo, buscando aproximar os valores estimados o mais próximo possível da realidade de cada obra.

### **3.2 Análise das emissões de CO<sub>2</sub>eq**

As análises de emissão de CO<sub>2</sub>eq ao longo da produção e implantação das soluções de pavimentos serão apresentadas em quatro seções, a saber: (i) pavimentos asfálticos; (ii) pavimentos rígidos; (iii) comparações entre as diferentes soluções; e (iv) avaliações complementares, seguindo a mesma sequência apresentada para os custos.

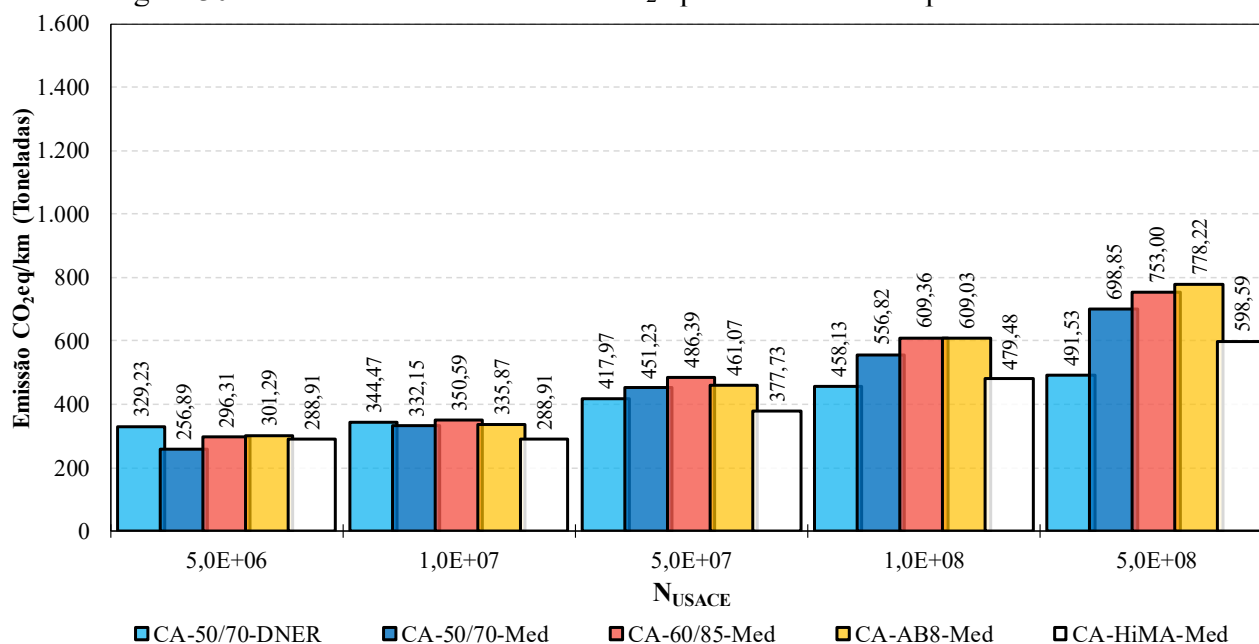
Destaca-se que os valores apresentados contemplam as emissões de GEE, aqui denominadas de CO<sub>2</sub>eq – referente à equivalência deste gás calculadas conforme metodologia deste estudo, segundo as premissas apresentadas.

#### **3.2.1 Emissões de CO<sub>2</sub>eq – pavimentos asfálticos**

Na Figura 30 são apresentadas as emissões totais estimadas para a implantação de 1 km das estruturas de pavimentos asfálticos, considerando diferentes condições de tráfego, materiais asfálticos e dois métodos de dimensionamento (DNER e MeDiNa).

Pode-se observar o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> para soluções de pavimentos asfálticos dimensionados à medida em que há o aumento do N<sub>USACE</sub>, conforme esperado, dado o aumento das espessuras das camadas para maiores níveis de solicitação, que conduz, por consequência, ao aumento do volume de material utilizado (A1-A3), o aumento das emissões de transporte (A4) e o aumento das emissões da fase de execução (A5).

Figura 30 - Estimativas de emissão de CO<sub>2</sub>eq das estruturas em pavimento asfáltico



Fonte: Autores

Em relação aos métodos DNER e MeDiNa de dimensionamento de pavimentos asfálticos, quando comparadas as soluções em CAP 50/70 (já que o método DNER não leva em conta diferentes tipos de ligante asfáltico), verifica-se que o método do DNER resulta em maiores emissões de CO<sub>2</sub>eq para as condições de tráfego até 1,0E+07; e menores emissões para as demais condições de tráfego. Tal fato é decorrente do método DNER possuir espessuras pré-fixadas de revestimento asfáltico em função do tráfego, enquanto o método MeDiNa estima de maneira empírico-mecanicista tal espessura, com base nas propriedades de rigidez e dano por fadiga do material.

Ressalta-se novamente que, conforme discutido na análise dos custos de revestimentos asfálticos, as soluções em CAP 50/70 podem não atender aos critérios de resistência à deformação permanente para tráfegos mais elevados.

Para as soluções obtidas pelo método MeDiNa, quatro diferentes misturas foram investigadas, contemplando ligantes do tipo CAP 50/70, AMP 60/85, AB-08, e HiMA, tendo, portanto, suas emissões potenciais de CO<sub>2</sub>eq por km de pavimento construído avaliadas. As variações observadas de emissão para as diferentes misturas foram significativas. Isto decorreu do fato das emissões de CO<sub>2</sub>eq dos agregados (em kg/t) ser sensivelmente menos expressivas daquelas da produção dos insumos asfálticos e da produção a mistura em usina (conforme será demonstrado em análises posteriores). Conclui-se, portanto, que as variações de emissões entre os cenários testados estão

ligadas com a elevação das espessuras das misturas asfálticas, os diferentes fatores de emissão de cada tipo de ligante asfáltico, além da dosagem das misturas, sendo estas as principais justificativas para as variações de emissões apontadas.

A mistura com ligante HiMA foi a que apresentou a menor emissão de  $\text{CO}_2\text{eq}$  para todos os tráfegos a partir de  $1,0\text{E}+07$ . Justifica-se tal comportamento pela maior resistência à fadiga desta mistura, que levou a menores espessuras de revestimento em todas análises. Adicionalmente, pode-se atribuir também o menor teor de ligante da mistura HiMA (4,60%) às menores emissões, mesmo que este ligante tenha apresentado o maior fator de emissão individual entre os ligantes asfálticos pesquisados.

A mistura com ligante CAP 50/70 demonstrou emissões maiores do que a mistura HiMA para todos os cenários dimensionados pelo MeDiNa (exceto  $5,0\text{E}+06$  onde todas as espessuras de revestimento são iguais a 5,0 cm). Contudo, as emissões com CAP 50/70 foram menores que as soluções em AMP 60/85 e AB-08, mesmo que as espessuras de revestimento tenham sido maiores para o CAP 50/70. Tal condição foi atribuída à presença de cal nas misturas AMP 60/85 e AB-08, uma vez que este material possuiu um elevado fator de emissão de  $\text{CO}_2\text{eq}$ , impactando de maneira importante nos valores finais de emissão.

Estudos demonstram que a utilização de cal tem um impacto positivo importante no desempenho de alguns tipos misturas asfálticas, melhorando a adesividade entre ligante e agregado, aumentando a rigidez e a resistência à deformação permanente e protegendo as misturas contra o envelhecimento de campo. Contudo, em termos de emissões de  $\text{CO}_2\text{eq}$ , a cal é um material que acresce, sensivelmente, o potencial emissor de GEE, devendo também ser avaliada a relação desempenho/sustentabilidade do uso de cal em estudos futuros.

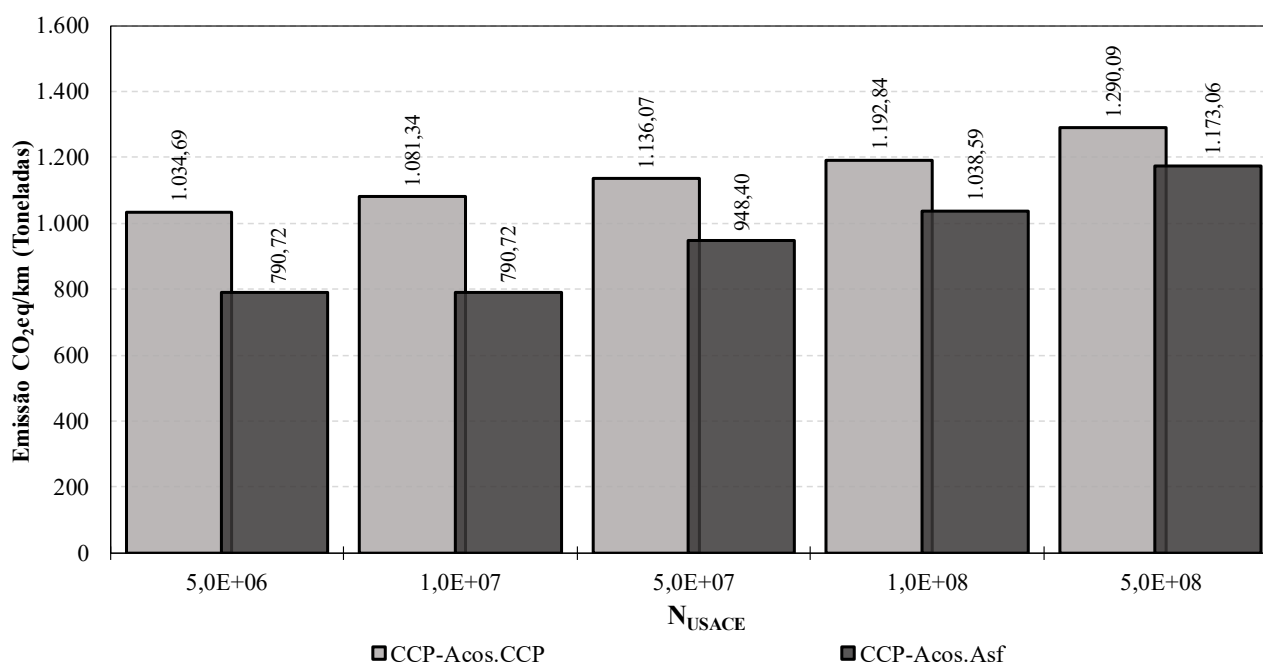
A despeito de as soluções em AB-08 (com utilização de Cal) apresentarem espessuras de revestimento ligeiramente mais esbeltas que para as misturas com AMP 60/85 (que também possuía cal em sua constituição), dado sua maior resistência à fadiga (AB-08), as emissões dos revestimentos empregando o asfalto-borracha, por demandarem maior energia para o aquecimento do ligante na usinagem e possuírem um maior teor de ligante, tornaram as emissões totais para as duas soluções muito semelhantes. Em tempo, ambas as misturas possuíram cal em seus traços.

### 3.2.2 Emissões de CO<sub>2</sub>eq – pavimentos de concreto de cimento Portland

Na Figura 31 são apresentadas as emissões estimadas para a implantação de 1 km das estruturas de pavimentos de concreto de CP, considerando diferentes condições de tráfego e soluções para os acostamentos.

Visualiza-se o acréscimo dos valores de emissão de CO<sub>2</sub>eq com a elevação das solicitações de tráfego, implicadas pelas maiores espessuras que levam a maiores emissões, função do aumento gradual do consumo de materiais, do dispêndio de energia para o seu transporte e na execução dos pavimentos.

Figura 31 - Estimativas de emissão para implantação das estruturas em pavimento de concreto de cimento Portland



Fonte: Autores

Os aumentos de emissões entre os distintos tráfegos não são tão expressivos, dada a pequena variação nas espessuras de concreto obtidas pelo método PCA-84, entretanto, esses números, observados sobre uma ótica de uma rodovia inteira, podem passar a apresentar diferença de emissão significativa entre os distintos tráfegos. Entretanto, as soluções em acostamento de concreto e em acostamento de pavimento flexível demonstraram variações importantes na emissão de CO<sub>2</sub>eq/km.

A solução de pavimento de CCP com acostamento em concreto também apresentou níveis maiores de emissão quando comparada a seus pares com acostamento em pavimento flexível,

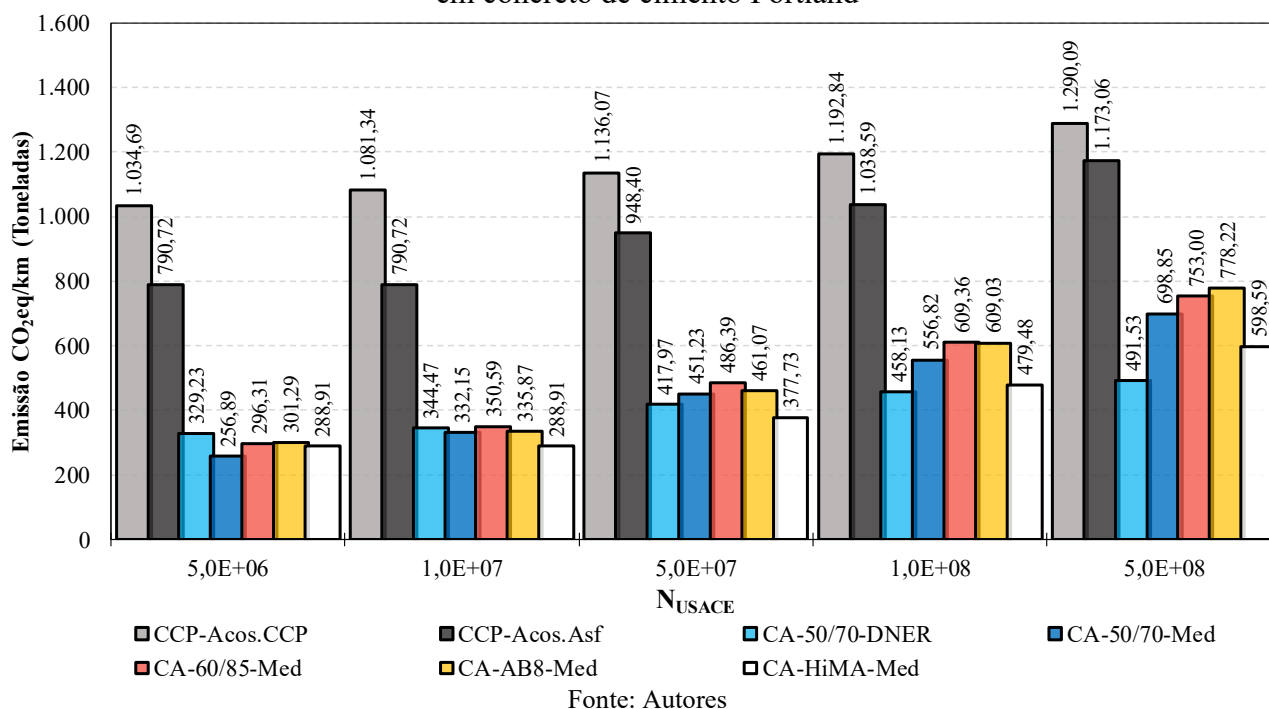
influenciada pelo maior fator de emissão do cimento, maior fonte contribuidora de emissões de CO<sub>2</sub> nesta alternativa de pavimentação.

Em geral, a diferença entre soluções de acostamento em CCP e asfáltico diminuem à medida que o tráfego aumenta, justificadas pela maior sensibilidade na variação de espessura da placa de concreto (sem acostamento em CCP) com o aumento do tráfego. As diferenças percentuais em ordem crescente, do menor para o maior tráfego, entre pavimento de CCP com acostamento em CCP ou acostamento asfáltico são: 23,58%, 26,86%, 16,52%, 12,93%, 9,07%, respectivamente.

### 3.2.3 Análise Comparativa de Emissões de CO<sub>2</sub>eq entre as soluções em pavimentos asfálticos e em concreto de cimento Portland

A comparação entre as soluções em pavimentos asfálticos e em pavimentos de CCP pode ser visualizada na Figura 32 que apresenta as emissões totais estimadas para implantação de 1 km de pavimento.

Figura 32 - Estimativas de emissão de CO<sub>2</sub>eq na implantação de estruturas de pavimento asfáltico e em concreto de cimento Portland



Os valores apresentados na Figura 32 demonstram que os pavimentos rígidos de CCP (tons de cinza no gráfico) apresentam níveis de emissão de CO<sub>2</sub>eq/km para implantação de rodovias muito



superiores aos observados para pavimentos asfálticos, influenciados principalmente pelo alto fator de emissão da produção do cimento CP II.

Em termos absolutos, verificam-se valores de emissões dos pavimentos de CCP com acostamento em CCP entre 1.034,69 tCO<sub>2</sub>eq/km de pavimento executado para tráfego de 5,0E+06 até 1.290,09 tCO<sub>2</sub>/km para o tráfego de 5,0E+08. As soluções de CCP com acostamento asfáltico apresentam valores entre 790,92 tCO<sub>2</sub>/km e 1.173,06 tCO<sub>2</sub>eq/km, entre o menor e o maior tráfego avaliado neste estudo.

As soluções em pavimentação asfáltica, considerando o método MeDiNa, demonstraram serem alternativas mais sustentáveis, independentemente do tráfego. A solução com mistura constituída de CAP 50/70 apresentou as menores emissões previstas (256,89 tCO<sub>2</sub>eq/km) para o menor tráfego (5,0E+06); e a solução com ligante HiMA foi a mais sustentável para todos os NUSACE avaliados a partir de 1E+07 (com emissões da ordem de 288,91 a 598,59 tCO<sub>2</sub>eq/km para tráfego de 1,0E+07 a 5,0E+08).

Em um cenário intermediário de tráfego, por exemplo, 5,0E+07, quando comparadas as soluções em CCP Acost.CCP e asfáltica em AMP 60/85 (bastante utilizada no cenário nacional), verifica-se que a solução em CCP emite 2,34 vezes mais CO<sub>2</sub>eq/km do que a solução asfáltica indicada. Essas diferenças são atenuadas para casos onde os níveis de tráfego são maiores, sendo para 1,0E+08, 1,96 vezes maior o valor de emissão do CCP, e para 5,0E+08, 1,71 vezes maior o valor de emissão do CCP. Essa atenuação é propiciada pela maior elevação das espessuras dos revestimentos asfálticos quando comparada ao incremento de espessura das placas de CCP com o aumento do tráfego.

Para a mistura com CAP 50/70 MeDiNa, em cenários potencialmente viáveis para a utilização desta solução (5,0E+06 e 1,0E+07), as diferenças para a solução de CCP-Acost.CCP são de 4,03 e 3,26 vezes menos emissões de CO<sub>2</sub>eq/km para a implantação do pavimento flexível nos respectivos tráfegos.

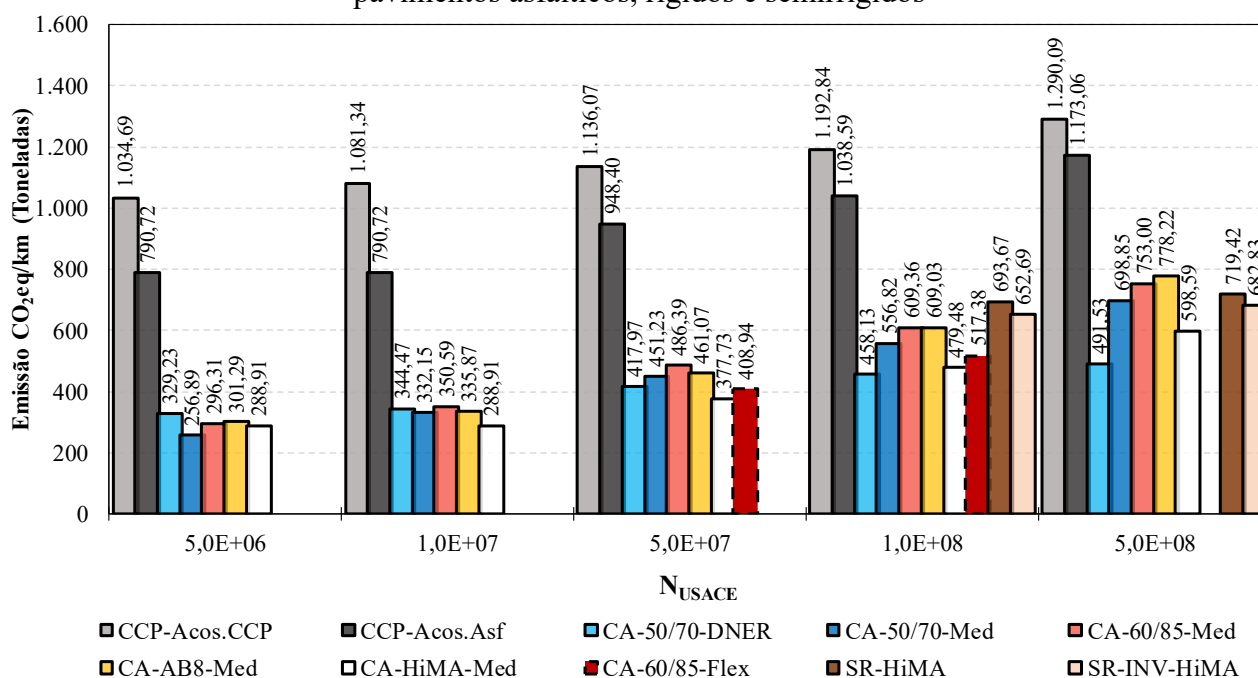
#### **3.2.4 *Análise de emissões de CO<sub>2</sub>eq – avaliações complementares***

Nesta etapa do estudo, à semelhança do que ocorrera para os custos, foram avaliados os impactos sobre as emissões previstas de GEE em relação à sensibilidade do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos empregado; e do comportamento semirrígido (invertido ou não) de pavimentos; além da contribuição dos ligantes asfálticos e do CP sobre as emissões totais.

### 3.2.4.1 Estruturas dimensionadas com o FlexPAVE™ e estruturas semirrígidas

Somadas às análises anteriores, também foram realizadas investigações complementares de emissões de CO<sub>2</sub>eq em alternativas de pavimentos utilizando o *software* FlexPAVE™ (para tráfego de 5,0E+07 e 1,0E+08 – considerando uma mistura com asfalto AMP 60/85), e também considerando soluções em pavimento semirrígido (para tráfego de 1,0E+08 e 5,0E+08). As soluções de dimensionamento foram apresentadas nas Tabelas 42 e 43 deste documento. As emissões calculadas podem ser visualizadas junto com as demais alternativas na Figura 33.

Figura 33 - Emissão de CO<sub>2</sub>eq para implantação de estruturas de pavimento considerando pavimentos asfálticos, rígidos e semirrígidos



Fonte: Autores

Conforme observa-se na Figura 33, as estruturas dimensionadas com o *software* FlexPAVE™ levam a menores emissões em comparação às simulações realizadas no MeDiNa para a mistura com o mesmo tipo de ligante asfáltico (-15,92% de emissão para 5,0E+07 e -15,09% de emissão para 1,0E+08). As diferenças ocorrem em função do FlexPAVE™ resultar em menores espessuras de revestimento asfáltico em comparação às estruturas do MeDiNa. Os valores indicam semelhanças entre as estruturas simuladas com asfalto HiMA pelo MeDiNa. Sugere-se, aqui, uma tendência de que todas as demais alternativas em pavimentação asfáltica, se dimensionadas pelo FlexPAVE™, resultariam em espessuras mais econômicas e, consequentemente, com menor impacto ambiental.

Para as estruturas de pavimentos semirrígidos (altos tráfegos), verifica-se que as soluções de pavimento semirrígido invertido apresentam menores emissões em relação ao convencional (semirrígido). Os menores valores de emissões nos pavimentos semirrígidos invertidos decorrem das menores espessuras demandadas de CCR (vide Tabela 44), que condicionava um menor consumo de CP (insumo de maior impacto na construção das estruturas semirrígidas).

Para o tráfego de  $1,0E+08$ , os valores de emissão de  $CO_2eq$  estimados para os pavimentos semirrígidos (invertidos ou convencionais) foram levemente superiores às emissões dos pavimentos de comportamento flexível com asfaltos modificados. Já para o tráfego de  $5,0E+08$ , as soluções em pavimentos flexíveis dimensionadas pelo MeDiNa (exceto para a solução em HiMA) ficaram com emissões semelhantes ou levemente superiores aos das alternativas em pavimentos semirrígidos.

### 3.2.4.2 Emissões por nível de tráfego para todas os cenários

Para baixos níveis de tráfego:  $5,0E+07$  (Figura 34) e  $1,0E+07$  (Figura 35), cenários passíveis de emprego, de misturas com ligante CAP 50/70, todas as alternativas em pavimentos asfálticos apresentam emissões de  $CO_2eq/km$  substancialmente inferiores aos dos pavimentos de CCP.

Figura 34 – Valores de emissão para implantação das estruturas avaliadas –  $N=5,0E+06$

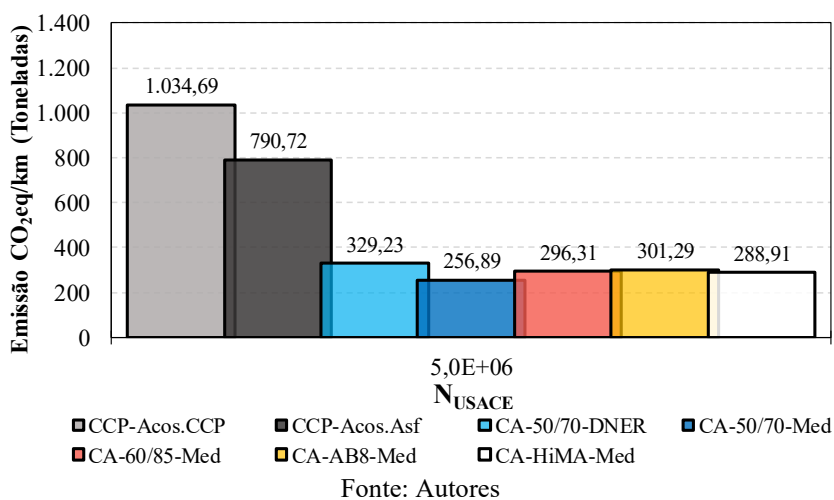
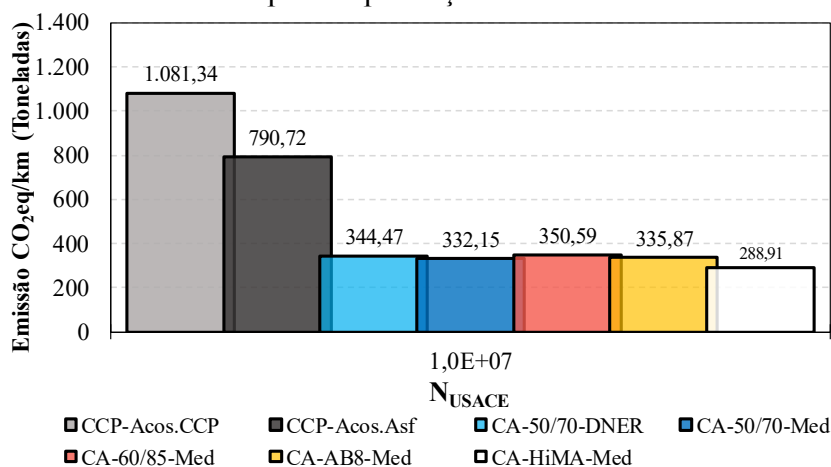


Figura 35 - Valores de emissão para implantação das estruturas avaliadas –  $N=1,0E+07$



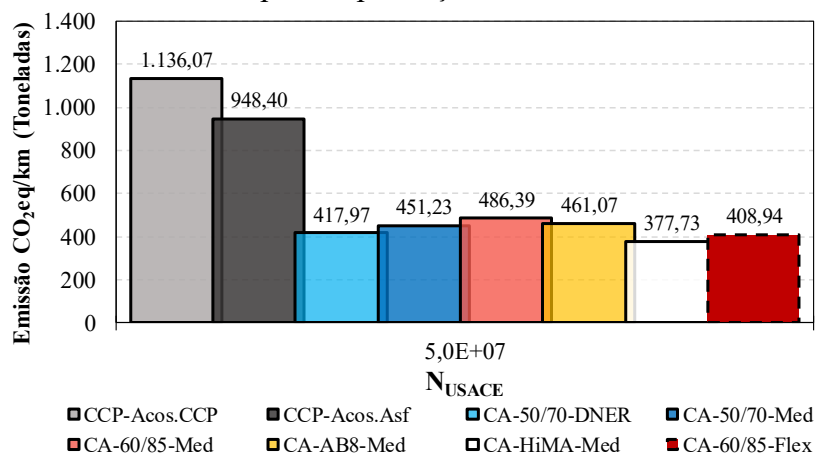
Fonte: Autores

Em todos os cenários de tráfego a partir de  $N_{USACE}=1,0E+07$ , a mistura com ligante HiMA se mostrou a mais sustentável, apresentando menor emissão de CO<sub>2</sub>eq/km, fato vinculado, principalmente, ao seu melhor desempenho à fadiga que resultou em menores espessuras, e a não utilização de Cal. Muito provavelmente tal fato também seria visualizado nas misturas com AMP 60/85 e AB-08 se essas não possuísem cal em suas composições.

As avaliações para  $5,0E+07$ ;  $1,0E+08$ ; e  $5,0E+08$  podem ser observadas nas Figura 36, 37 e 38, respectivamente. Os pavimentos executados com CCP Acos.CCP e CCP Acos.Asf propiciaram maior emissão em todos os tráfegos analisados. As soluções em pavimentos semirrígidos foram competitivas em termos de sustentabilidade para o maior tráfego analisados ( $5,0E+08$ ), entretanto, para  $1,0E+08$  solicitações, emitiram menos que os pavimentos em CCP e mais que os pavimentos asfálticos.

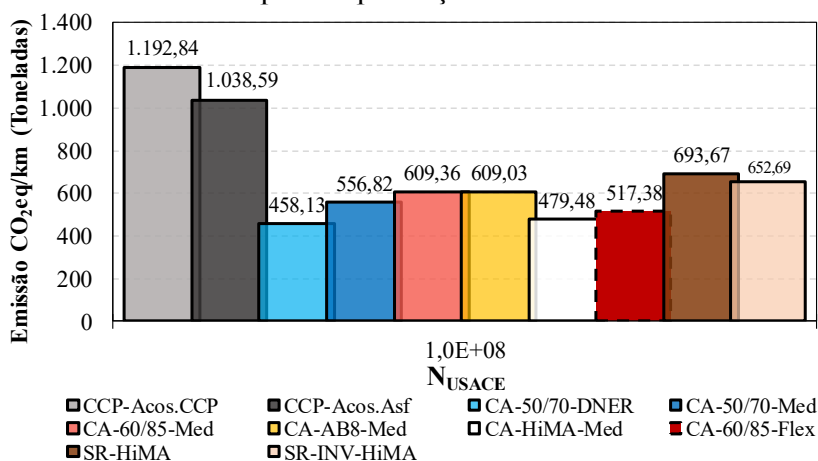
As soluções de dimensionamento no FlexPAVE™ com mistura constituída de AMP 60/85 possuem menor potencial emissor do que a mesma dimensionada pelo MeDiNa, visto que demandaram menores espessuras da camada de revestimento.

Figura 36 - Valores de emissão para implantação das estruturas avaliadas – N=5,0E+07



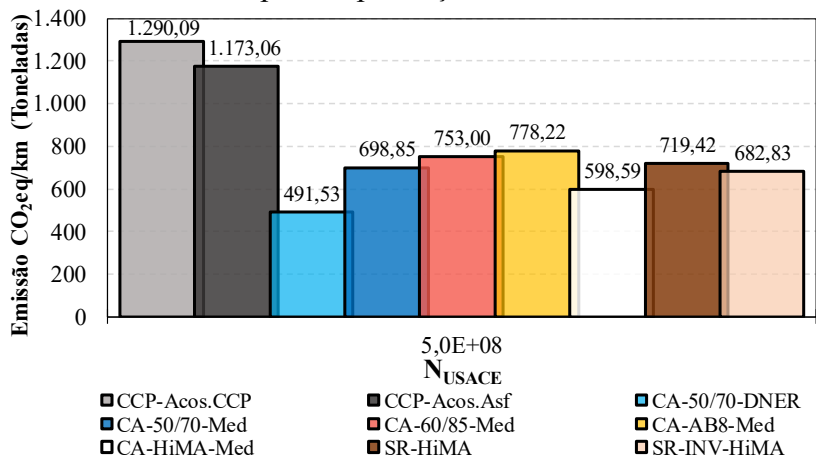
Fonte: Autores

Figura 37 - Valores de emissão para implantação das estruturas avaliadas – N=1,0E+08



Fonte: Autores

Figura 38 - Valores de emissão para implantação das estruturas avaliadas – N=5,0E+08



Fonte: Autores

Considerando a prática atual, de projetos de pavimentos de CCP utilizando acostamentos em CCP, e recomendações de não utilização de CAP 50/70 para tráfegos superiores a  $1,0E+07$ , apresenta-se, na Tabela 48, as diferenças percentuais de emissões de  $CO_2eq$  de pavimentos asfálticos e semirrígidos em relação aos pavimentos rígidos (com acostamento em CCP), para os cenários avaliados neste estudo.

Tabela 48 – Síntese das diferenças percentuais de emissão de  $CO_2eq$  em relação aos pavimentos rígidos com acostamento em concreto de cimento Portland

N <sub>USACE</sub>	CA-50/70-DNER	CA-50/70-Med	CA-60/85-Med	CA-AB8-Med	CA-HiMA-Med	CA-60/85-Flex	SR-HiMA	SR-INV-HiMA
$5 \times 10^6$	-68,18%	-75,17%	-71,36%	-70,88%	-72,08%	-	-	-
$10^7$	-68,14%	-69,28%	-67,58%	-68,94%	-73,28%	-	-	-
$5 \times 10^7$	-	-	-57,19%	-59,41%	-66,75%	-64,00%	-	-
$10^8$	-	-	-48,91%	-48,94%	-59,80%	-56,62%	-41,85%	-45,28%
$5 \times 10^8$	-	-	-41,63%	-39,68%	-53,60%	-	-44,23%	-47,07%

Nota: Desconsiderando a utilização de CAP 50/70 para tráfegos maiores que  $10^7$ .

Fonte: Autores

Percebe-se uma certa semelhança nos valores percentuais de emissões dentro de um mesmo nível de tráfego quando comparado o pavimento em CCP (com acostamento também em CCP) com as soluções asfálticas e semirrígidas. Em geral, as soluções mais sustentáveis para cada nível de solicitação foram: pavimento com mistura CAP 50/70 dimensionada pelo MeDiNa para tráfego de  $5,0E+06$ ; e a solução em HiMA para todos os demais tráfegos.

Dada a semelhança dos valores de emissões das soluções em pavimentos de comportamento flexível, seria possível afirmar que uma eventual dosagem sem cal para as misturas com AMP 60/85 e AB-08, produziram igual nível de emissões entre as alternativas de pavimentos asfálticos.

É importante destacar, novamente, que as análises representam os materiais e condições simulados. Todavia, conforme já abordado na metodologia, tratam-se de misturas asfálticas com comportamento mediano, buscando representar materiais usualmente utilizados em obras no país. Ademais, análises com um maior banco de dados de misturas podem levar a estratégias capazes de reduzir, ainda mais, as emissões de GEE.

Considerando a similaridade de redução de emissões entre as alternativas para um mesmo número de solicitações, a média de redução de emissões dos pavimentos asfálticos foi calculada para cada nível de tráfego, comparando-a com a condição de pavimento com toda a plataforma em CCP. Para  $N = 5,0E+06$ , as misturas asfálticas demonstraram emitir, em média, 71,53% menos  $CO_2eq$  do que o pavimento rígido em CCP. Reduções médias de 69,44%, 61,83%, 53,57% e 44,97% foram

obtidas para os tráfegos de  $1,0E+07$ ,  $5,0E+07$ ,  $1,0E+08$  e  $5,0E+08$ , respectivamente. Em relação aos pavimentos semirrígidos, as reduções médias, quando comparadas àquelas do pavimento completo em CCP, foram de 43,57% e 45,65% para semirrígido e semirrígido invertido, respectivamente.

#### ***3.2.4.3 Proporção de emissão de CO<sub>2</sub>eq para cada grupo do processo construtivo***

As emissões calculadas para cada solução de pavimentação foram discretizadas nos grupos referentes às distintas etapas construtivas, compreendendo a produção + transporte até usina + usinagem (A1 – A3) dos materiais, transporte dos materiais para a obra (A4) e execução do pavimento (A5), a fim de se avaliar a influência de cada etapa nos valores finais de emissões de cada solução. Os resultados estão apresentados na Figura 39.

Para as estruturas de pavimento de CCP, com acostamento em CCP, as emissões dos grupos A1+A2+A3 (A1-A3), referentes à produção dos insumos, são responsáveis por percentuais entre 82,52% e 83,45% do total calculado por km, demonstrando pequena variação à medida que o tráfego aumenta. O grupo A4, representativo do transporte dos materiais para a obra, impactado diretamente pela distância média de transporte, foi responsável por percentuais de emissão entre 13,77% e 15,07%. Para a execução do pavimento em CCP-Acos.CCP, o peso das emissões variou entre 1,82% e 2,36%.

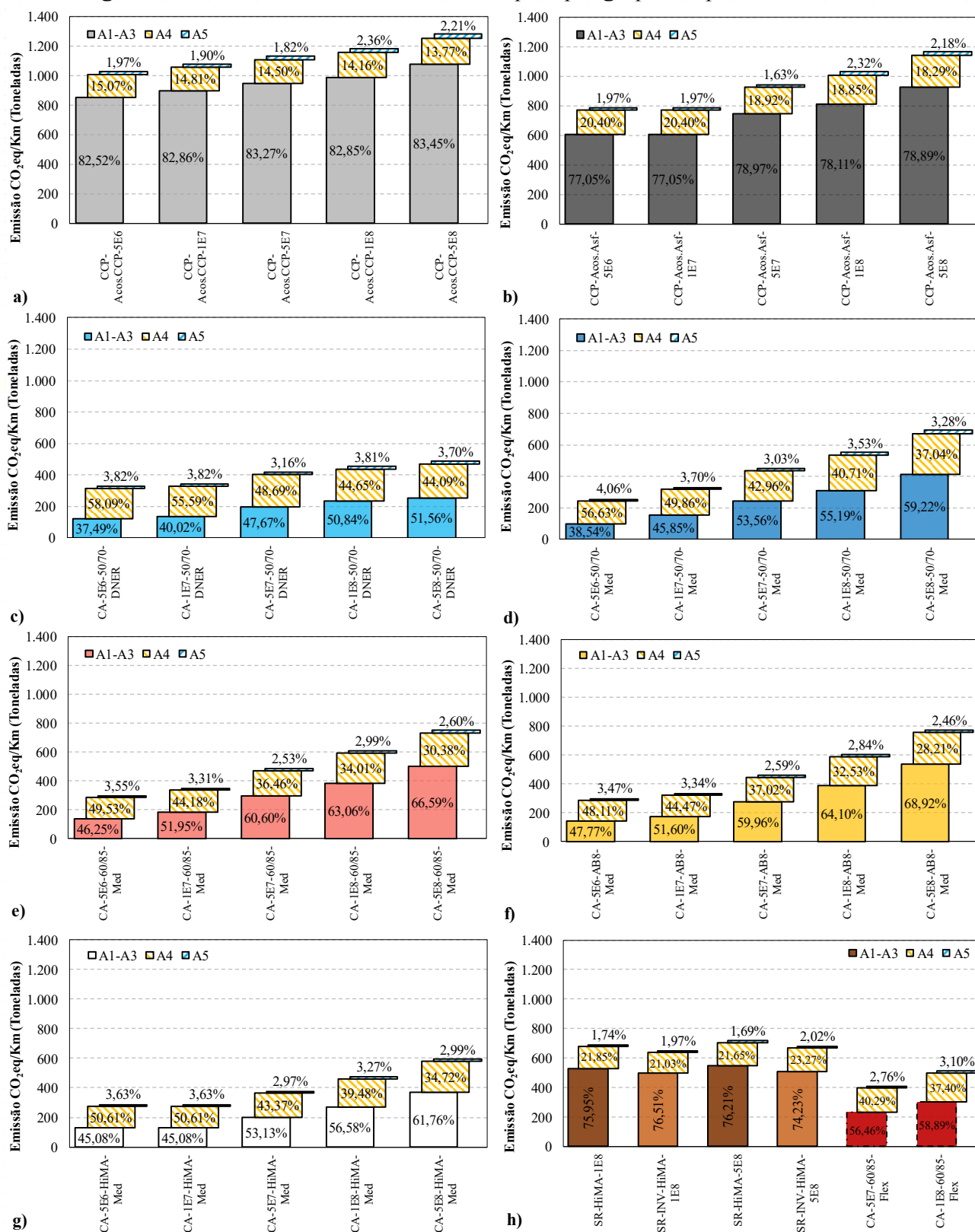
Tais resultados demonstram que, para a solução em placas de CCP (inclusive no acostamento), a produção dos materiais é a fase de maior potencial emissor, enquanto a execução do serviço apresenta impacto pequeno sobre as emissões totais.

As soluções de CCP com acostamento em revestimento asfáltico apresentam pesos semelhantes, mas ligeiramente inferiores, com uma leve queda na porcentagem de emissão do grupo A1-A3 (77,05% a 78,89%). O grupo A4 teve um leve aumento de representatividade com pesos entre 18,29% e 20,40%. Essa variação de queda percentual para o grupo A1-A3 e aumento do grupo A4 é justificado pela menor emissão das soluções com acostamento asfáltico em relação aos cenários com acostamento em CCP. As parcelas de emissão de CO<sub>2</sub>eq para a execução do pavimento (A5) variaram entre 1,63% e 2,32% do total emitido.

Para todas as soluções de pavimentação asfáltica, englobando todos os distintos ligantes empregados, tráfegos avaliados e métodos de dimensionamento, observou-se uma expressiva queda do peso do grupo A1-A3 e o aumento para a parcela de transporte para a obra (A4), quando comparados aos pavimentos de CCP.



Figura 39 – Percentual de Emissão de CO<sub>2</sub>eq/km por grupos do processo construtivo



Fonte: Autores

Tais observações para as etapas A1-A3 decorrem do fato de a produção dos ligantes asfálticos emitirem substancialmente menos GEE quando comparadas às emissões de CP. Ressalta-se, ainda, que a etapa de usinagem dos concretos asfálticos, processo que demanda grande dispêndio de energia e, por conseguinte, com grande impacto nas emissões, foi incluída no cômputo de A1-A3. Em geral os valores de A4 são afetados pela DMT até a obra e, para este estudo, situaram-se entre 28,21% e 58,09% dos totais de emissões. A emissão da execução dos pavimentos asfálticos (A5) demonstra ser uma parcela pequena dentro das emissões totais, apresentando valores entre 2,46% e 4,06% da emissão total de CO<sub>2</sub>eq/km.

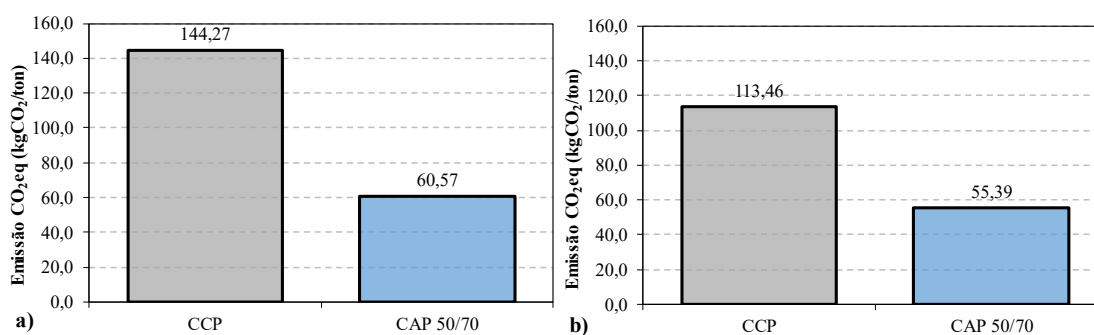
Os pavimentos semirrígidos apresentaram entre 74,23% e 76,51% das emissões na produção dos insumos (A1-A3); entre 21,03% e 23,27% referente ao transporte para obra (A4); e de 1,69% a 2,02% para a execução do pavimento (A5).

#### 3.2.4.4 Emissões por tonelada produzida de CCP e Mistura Asfáltica

As emissões por tonelada produzida ao final do grupo A1 – A3, representando o CCP pronto, pós-usina de concreto, e a mistura asfáltica, também pronta e já usinada, foram calculadas e estão apresentados na Figura 40.

As emissões de CO<sub>2</sub>eq por tonelada foram de 144,27 kgCO<sub>2</sub>eq/t para o CCP; 60,57 kgCO<sub>2</sub>eq/t para a mistura asfáltica com CAP 50/70, quando considerados os fatores de emissões encontrados em literatura e já sumarizados neste estudo.

Figura 40 - Emissão de CO<sub>2</sub>eq por tonelada de concreto de cimento Portland e de mistura asfáltica produzida: a) Cenário: Projetos reais + fatores de emissão de literatura; b) Cenário: Projetos reais + fatores de emissão ABCP e Petrobras



Fonte: Autores

Para o cenário em que foram empregados os fatores de emissões do CP citados pela ABCP de 564 kgCO<sub>2</sub>eq/t<sup>47a</sup> para o cimento e pela Petrobras de 264 kgCO<sub>2</sub>eq/t<sup>50b</sup> para o ligante asfáltico CAP 50/70, os novos valores estimados de emissões de GEE foram de 113,46 kgCO<sub>2</sub>eq/t e 55,39 kgCO<sub>2</sub>eq/t para CCP e CAP50/70, respectivamente.

Percebe-se, ao avaliar pelo cenário de literatura (Figura 40a), que a mistura asfáltica constituída de CAP50/70 é a que apresenta as menores emissões para a produção de uma tonelada de massa asfáltica, sendo 58,01% menos emissiva de GEE quando comparada à tonelada de CCP.

Visualiza-se também, ao avaliar as emissões indicadas para o CP da representante da indústria do CP no Brasil (ABCP) e pela empresa responsável pelo refino de petróleo no país, PETROBRAS (vide Figura 40b), que a mistura asfáltica constituída de CAP50/70 apresenta emissões de GEE cerca de 50% inferior à produção da mesma quantidade de CCP. Mesmo cruzando as informações encontradas na literatura para as emissões de CO<sub>2</sub> de misturas asfálticas, desprezando os valores informados pela PETROBRAS, e comparando com as emissões obtidas a partir dos dados da ABCP, a tonelada produzida de mistura asfáltica com CAP 50/70 continua sendo muito menor que àquelas da produção do CCP.

Cabe, por fim, reforçar que a análise por tonelada de CCP e mistura asfáltica não permite mensurar, de maneira precisa, a verdadeira magnitude das emissões totais decorrentes da construção das alternativas de pavimentação com estes dois materiais e submetidos a uma mesma condição de tráfego. Tal impacto já fora avaliado nos itens anteriores, em que, para uma mesma condição de tráfego, o volume de CCP era sempre superior ao volume de concreto asfáltico. Contudo, esses valores foram avaliados neste estudo para permitir uma visão mais resumida dessas emissões.

#### ***3.2.4.5 Impacto dos distintos materiais e serviços sobre as emissões de CO<sub>2</sub> durante a construção do pavimento***

A fim de se verificar os impactos de cada material empregado na pavimentação, bem como de suas etapas construtivas sobre as emissões de CO<sub>2</sub>eq durante a execução dos pavimentos, dois

<sup>47a</sup> Matéria veiculada no dia 15/04/2025 no site da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que traz o valor do fator de emissão atual do cimento no Brasil de 564 kgCO<sub>2</sub>/t;

<sup>50b</sup> Segundo informações recentes divulgadas pela área de clima da Petrobras, o valor de 264kg/t de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> é o valor máximo de emissões aferidos e validados nas refinarias brasileiras que contam com o sistema de ACV Digital. Este valor é sensivelmente inferior àqueles encontrados em refinarias internacionais e, possivelmente, decorrem da grande influência que as emissões de CAP possuem das emissões do petróleo de origem. A produção de petróleo nacional é menos emissiva que as internacionais. Como as análises de ACV internacionais não detalham a composição, estima-se, também, que as refinarias brasileiras apresentam um leque muito grande de produtos, o que pode diluir as emissões de CO<sub>2</sub> em um espectro maior de insumos. Pode-se somar ainda, o fato de a matriz energética do Brasil ser menos emissiva que as matrizes de outros países.

cenários foram avaliados, sendo o primeiro uma solução em pavimento de CCP com acostamento também em CCP, e o segundo uma solução em pavimento asfáltico com AMP 60/85. As análises foram particularizadas para o tráfego de  $1,0E+08$ , condição de similaridade em termos de custos de implantação.

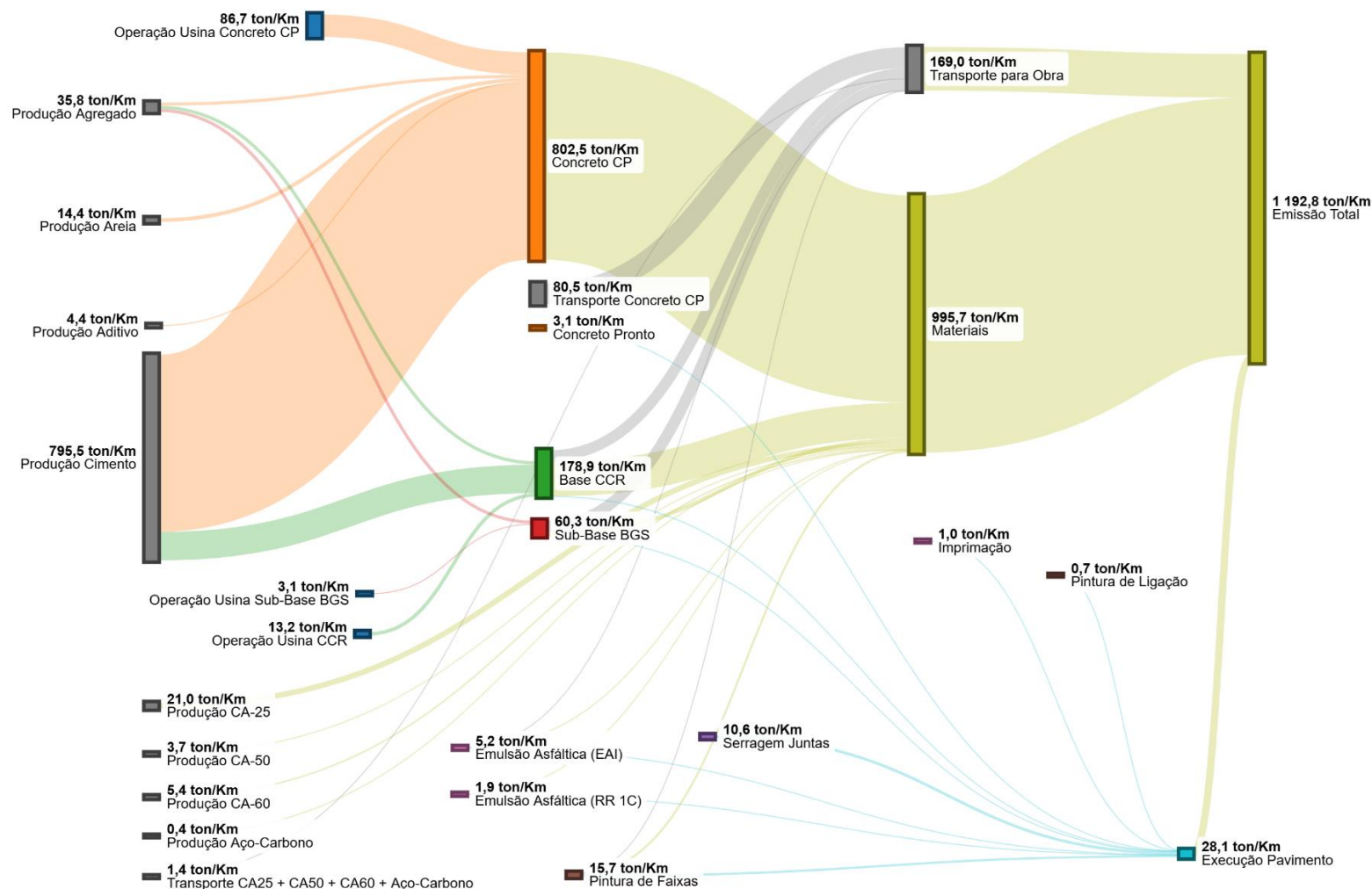
A discretização das emissões para o pavimento de CCP pode ser visualizada na Figura 41, enquanto a Figura 42 demonstra os mesmos dados para a solução em concreto asfáltico com AMP 60/85. A partir dos dados dispostos nestas figuras, verifica-se, na solução de pavimento de CCP, que a emissão da produção do CP, utilizado nas placas de concreto de toda a plataforma do pavimento e na base em CCR, é o maior contribuinte para o total de emissões de  $CO_2eq$ , contribuindo com 795,5  $tCO_2eq/km$  de um total de emissões de 1.192,8  $tCO_2eq/km$ , representando 66,7% do total emitido para esta solução de pavimentação.

As emissões de GEE, ao final da usinagem do CCP, totalizam 802,5  $tCO_2eq/km$ , obtidas pelo somatório das produções do cimento, do aditivo, da areia e do agregado graúdo, incluindo também as emissões das operações de usinagem. O CCP pronto para ser transportado para a obra é responsável pela maior parcela das emissões na composição estrutural do pavimento estudado. Se somadas todas as emissões para a produção dos materiais aplicados na pavimentação em CCP, incluindo o CCR, aço, emulsões asfálticas e tintas para sinalização (A1-A3), estima-se uma emissão de 995,7  $tCO_2eq/km$ .

O Grupo A2, referente ao transporte do agregado até as usinas de produção de CCP, CCR, BGS, forma considerado dentro da emissão da produção da usina, contribuindo, portanto, para as emissões do grupo A1-A3 destes materiais. As emissões totais referentes ao transporte dos materiais, já usinados, até a frente de serviço (A4), são constituídas, em ordem decrescente, de emissões pelo transporte do CCP (80,50  $tCO_2eq/km$ ), da BGS (43,40  $tCO_2eq/km$ ) e do CCR (42,30  $tCO_2eq/km$ ), acrescidas por pequenas parcelas referentes ao transporte dos aços, das emulsões e das tintas de demarcação viária, totalizando uma emissão de 169,0  $tCO_2/km$  em transportes para obra (A4). Os serviços de execução do pavimento (A5) emitiram adicionais 28,10  $tCO_2eq/km$ , integralizando, assim, as emissões totais na construção do pavimento de CCP (A1-A5) de 1.192,84  $tCO_2eq/km$ .

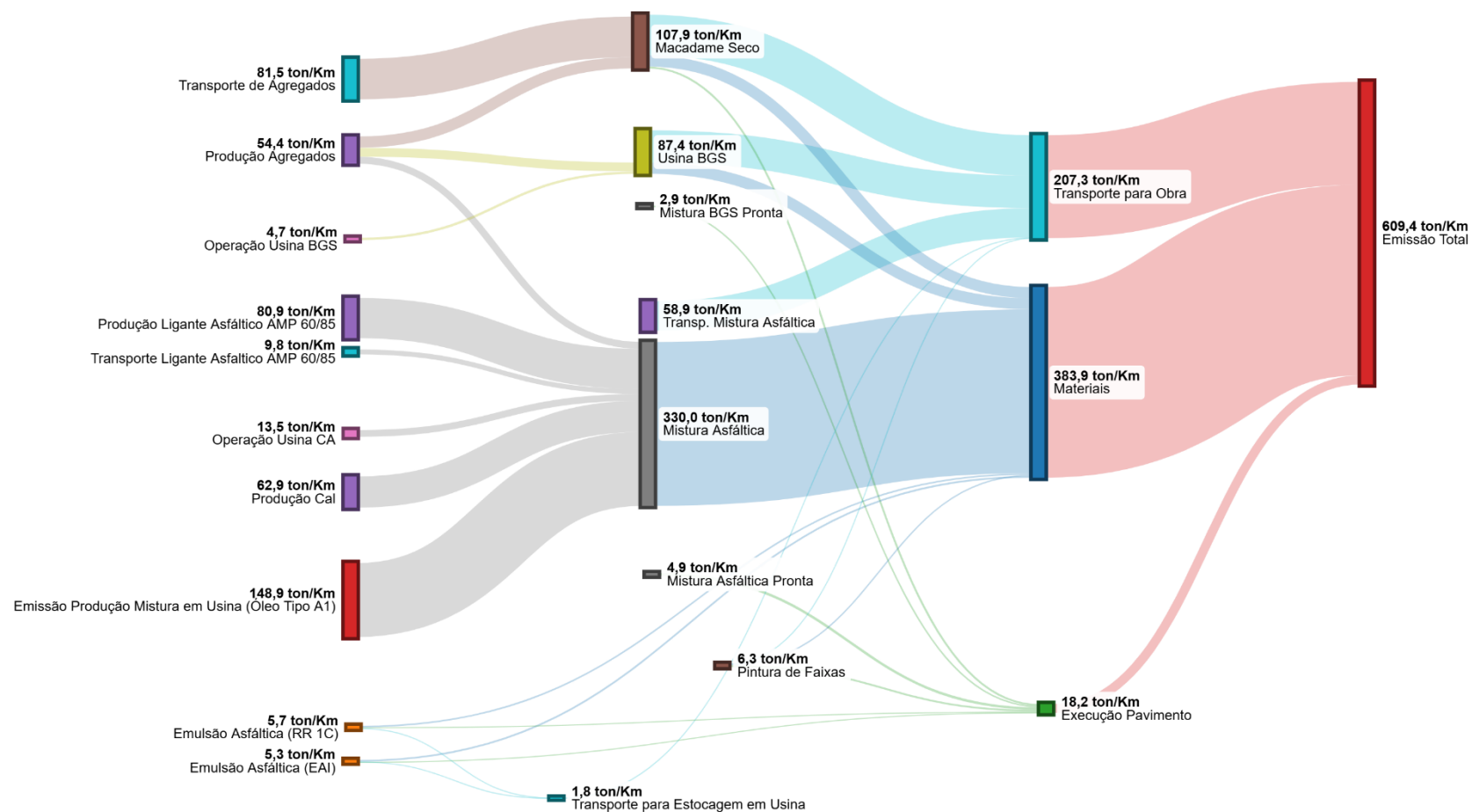
Com os dados informados, portanto, pode-se dizer que a produção dos materiais básicos à construção do pavimento de CCP contribui com 83,47% das emissões de GEE (A1-A3); o transporte para a frente de serviço (A4) é responsável por 14,17%; e a execução direta da obra (A5) por 2,36% das emissões totais. Lembrando que a produção de CP representou 66,7% das emissões previstas para a construção do pavimento de CCP ora avaliado.

Figura 41 – Contribuições discretizadas das emissões de CO<sub>2</sub>eq para um quilometro de pavimento em CCP – N = 1,0E+08



Fonte: Autores

Figura 42 - Contribuições discretizadas das emissões de CO<sub>2</sub>eq para um quilometro de pavimento asfáltico (AMP 60/85) – N = 1,0E+08



Fonte: Autores



Por analogia, pode-se considerar que, para os demais cenários de soluções em pavimentos de CCP, o impacto, em termos percentuais de cada produto e serviço dentro das emissões totais seja semelhante, com a produção do CP sendo o principal responsável pelas emissões. Convém ressaltar que as soluções de CCP com acostamento asfáltico apresentaram uma pequena redução nas emissões de GEE em função da redução do consumo de CP em detrimento do emprego de cimento asfáltico na produção das misturas do acostamento.

Em relação à discretização dos processos para a alternativa em pavimentação asfáltica com mistura constituída de AMP60/85, pode-se observar que o impacto de cada produto é mais distribuído, além de as emissões totais de GEE serem substancialmente inferiores, estimada em 609,4 tCO<sub>2</sub>eq/km.

Verifica-se que a utilização de óleo combustível Tipo A1, conforme previsto no SICRO, empregado na usina de concreto asfáltico é o maior contribuinte (148,90 tCO<sub>2</sub>eq/km) do total de emissão de CO<sub>2</sub>, representando 24,4% do total emitido. Já a produção do ligante, estimada em 80,90 tCO<sub>2</sub>eq/km e a produção da cal (62,90 tCO<sub>2</sub>eq/km), utilizada nesta mistura, foram o segundo e o terceiro maiores responsáveis pelas emissões, com 13,3% e 10,3%, respectivamente, em relação aos totais previstos (609,40 tCO<sub>2</sub>eq/km).

A produção da mistura asfáltica (A1-A3), especificamente, respondeu a um total de 330,00 tCO<sub>2</sub>eq/Km, representando 54,2% do total de emissões desta solução em pavimento flexível. Misturas que não utilizam cal, desde que mantido igual desempenho, poderiam reduzir sensivelmente as emissões de GEE.

Conforme demonstrado anteriormente, a fase de transporte (A4) responde por uma parcela importante das emissões de CO<sub>2</sub>eq nas alternativas de pavimentação asfáltica. O transporte do Macadame Seco (81,50 tCO<sub>2</sub>eq/km), da BGS (65,00 tCO<sub>2</sub>eq/km), e da mistura asfáltica (58,90 tCO<sub>2</sub>eq/km) são os principais emissores na fase de transporte de materiais para a frente de serviço, respondendo por 13,4% 10,7% e 9,7% das emissões totais respectivamente. Esses valores, somados ao transporte das emulsões e tintas de sinalização, conduzem ao total de emissões estimadas para A4 de 207,30 tCO<sub>2</sub>eq/km (34% do total).

É importante considerar que os pavimentos asfálticos, por emitirem, em termos absolutos, menos GEE no total que os pavimentos de CCP, acabam por apresentar uma contribuição relativa (ou percentual) maior das emissões na fase de transporte para a obra (A4). Contudo, em termos totais emitidos no transporte (A4), os valores de emissões estimados para a construção de pavimentos de CCP foi de 169,4 tCO<sub>2</sub>eq/km (14,2% do total de emissões – 1.192,84 tCO<sub>2</sub>eq/km), enquanto para a solução de asfáltica foi de 207,3 tCO<sub>2</sub>eq/km (34% do total de 609,4 tCO<sub>2</sub>eq/km).



A execução do pavimento (A5), assim como para o CCP, teve uma parcela pequena de contribuição nas emissões totais (18,2 tCO<sub>2</sub>eq/km ou 2,99%), que somada aos demais grupos levou a uma emissão total (A1-A5) de 609,4 tCO<sub>2</sub>eq/km.

#### ***3.2.4.6 Análise de sensibilidade sobre as emissões – consumo de ligantes asfálticos e de cimento***

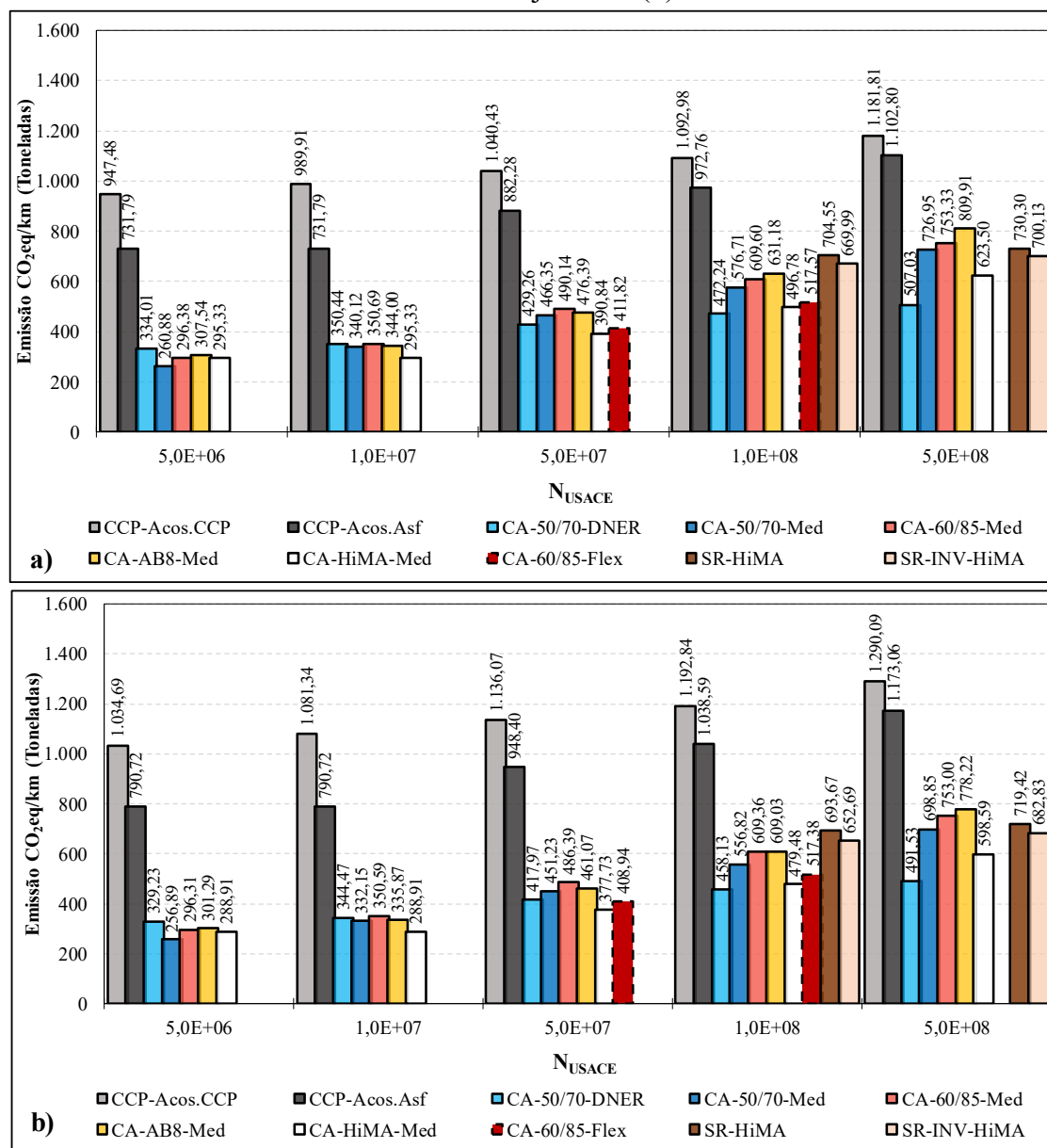
##### ***Portland***

Conforme descrito na seção de estimativa de preços, a emissão para implantação das estruturas foram recalculadas utilizando os consumos originais das composições do SICRO (Orçamento SICRO), diferentes dos consumos das dosagens reais que vinham sendo considerados (Orçamento referencial), conforme demonstrado anteriormente na Tabela 46 e Tabela 47. Os resultados encontrados para o cenário, que levou a um maior consumo de asfalto nos pavimentos flexíveis e a um menor consumo de cimento nos pavimentos rígidos pode ser visualizados na Figura 43.

A partir dos novos consumos de insumos básicos, percebe-se uma leve queda nas emissões dos pavimentos rígidos e um aumento das emissões nos pavimentos asfálticos, embora os pavimentos asfálticos ainda apresentem níveis significativamente menores de emissão de CO<sub>2</sub>eq para todas as condições. Para o tráfego de 1,0E+07, por exemplo, com os consumos do SICRO adotados, a solução integral de CCP emitiria 989,91 tCO<sub>2</sub>eq/km (8% menor), e a estrutura com concreto asfáltico com CAP 50/70 (MeDiNa), por exemplo, emitiria 340,12 tCO<sub>2</sub>eq/km (2% maior).

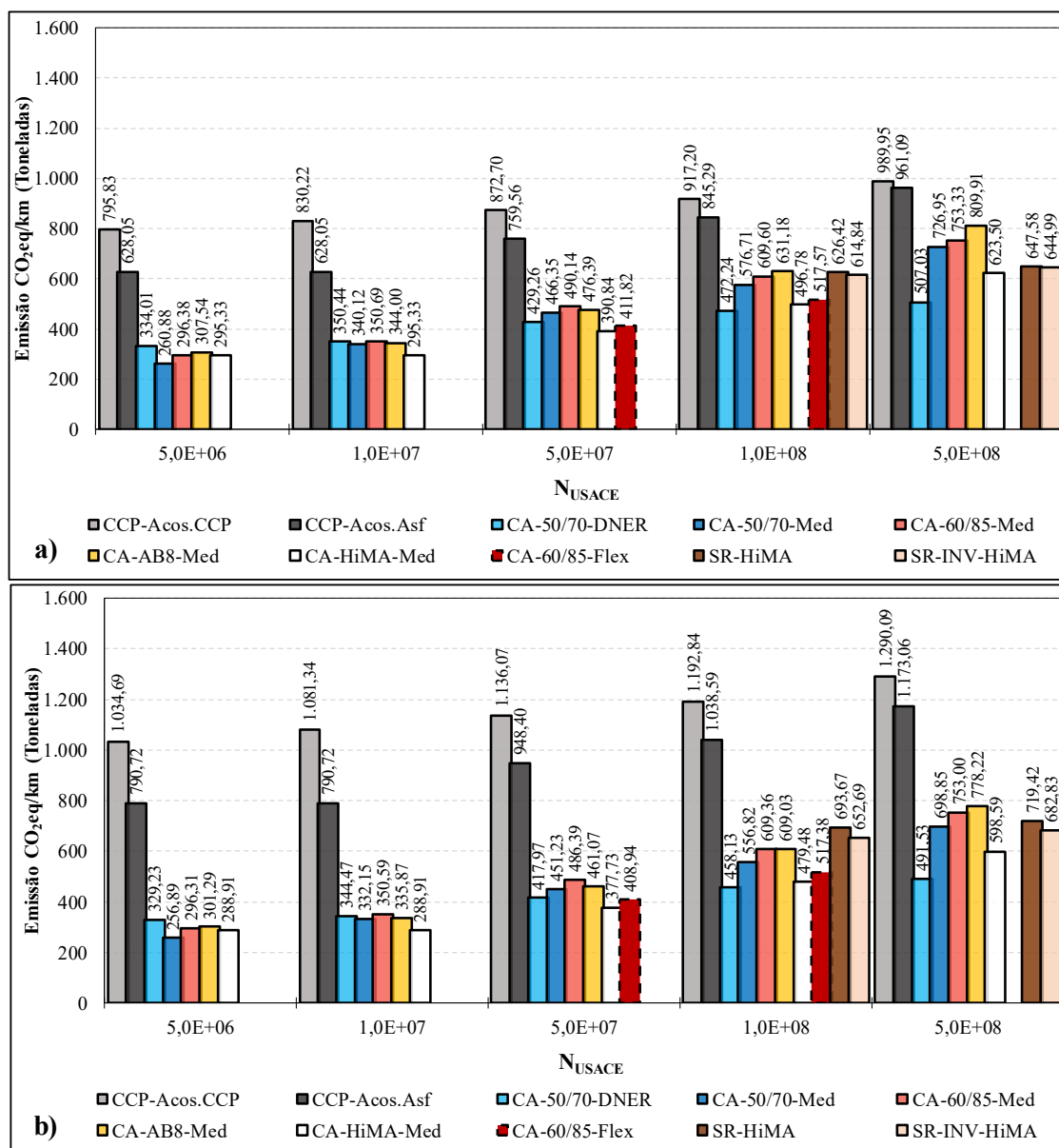
Um segundo caso de análise de sensibilidade dos parâmetros foi considerado, a partir de matéria veiculada no dia 15/04/2025 no site da ABCP, que traz o valor do fator de emissão atual do cimento no Brasil de 564 kgCO<sub>2</sub>/t de cimento produzido. A partir desse novo valor, somado aos menores consumos de cimento e maiores consumos de asfalto da análise anterior, uma nova estimativa de emissões foi realizada, estando os resultados apresentados na Figura 44. Ressalta-se que esse valor de fator de emissão do cimento é disponibilizado em matéria jornalística, não sendo reportado em estudo científico.

Figura 43 – Valores de emissão de tCO<sub>2</sub>eq/km das estruturas avaliadas – consumos SICRO (a) e consumos ajustados (b)



Fonte: Autores

Figura 44 - Valores de emissão de tCO<sub>2</sub>eq/km das estruturas avaliadas – consumos SICRO + Fator de emissão ABCP (a) e consumos ajustados (b)



Fonte: Autores

Nota-se, a partir desta análise, mesmo os valores de emissões para os pavimentos rígidos sofrendo uma forte redução em relação às análises de sensibilidade anteriores, que as emissões previstas para a construção de pavimentos de CCP continuam significativamente superiores às dos pavimentos asfálticos. Para o tráfego de 5,0E+06, a solução em CAP50/70 MeDiNa é 67,22% menos emissiva de CO<sub>2</sub>eq do que a alternativa de pavimento completo em CCP. Para 1,0E+07, esta mesma relação é de 59,03%. Quando se compara o pavimento em CCP em tráfego de 5,0E+07 com o pavimento asfáltico AMP 60/85 (material amplamente empregado em altos volumes de tráfego),

observa-se que o pavimento flexível emitiria 43,84% menos CO<sub>2</sub>eq do que a solução em pavimento rígido.

Para volumes ainda mais expressivos de tráfego, como 1,0E+08 e 5,0E+08, as emissões são 33,53% e 23,90% menores para a mistura com AMP 60/85; 31,18% e 18,18% para a solução com AB-08 e 45,83% e 37,01% para a solução com ligante HiMA, quando comparadas ao pavimento completo em CCP. Ainda para o tráfego de 5,0E+08, as soluções em pavimentos semirrígidos são as que apresentam emissividade de GEE (com exceção de CAP 50/70 DNER que não é indicado para esse nível de solicitação), com emissão de 48,17% e 44,03% menores para semirrígido e semirrígido invertido respectivamente quando comparados a solução completa em CCP.

Em síntese, mesmo com as alterações dos consumos de CP e dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub>eq para as condições menos emissivas para os pavimentos de CCP, ainda assim, os valores finais de emissão de CO<sub>2</sub>eq demonstraram que os pavimentos flexíveis são substancialmente menos emissivos.

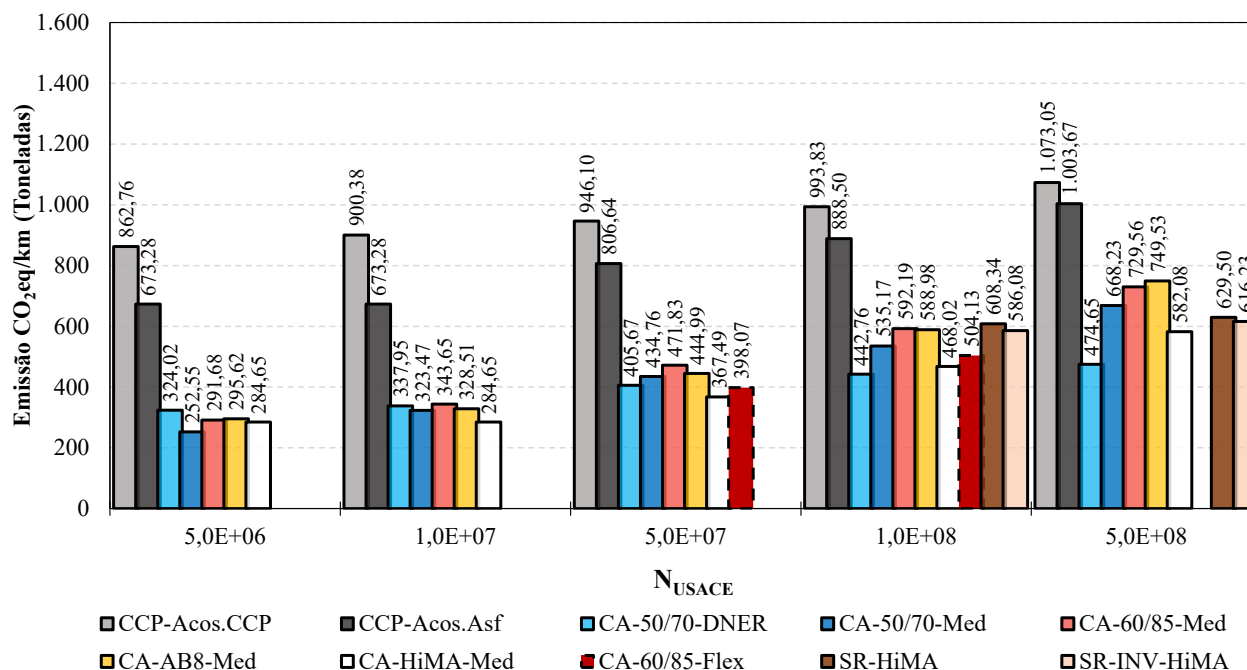
Em contraponto ao cenário indicado anteriormente, novas simulações foram realizadas apropriando-se dos valores recentemente informados pela PETROBRAS<sup>51</sup> e já descrito neste estudo, com um fator de emissão para o ligante convencional CAP 50/70 de 264 kgCO<sub>2</sub>eq/t, compreendendo desde a produção do petróleo até o produto pronto na refinaria. Também é importante aqui ressaltar que a informação não foi obtida em estudo científico e é considerada preliminar pela empresa petrolífera.

Para calcular os novos valores totais de emissões de CO<sub>2</sub>eq, os demais ligantes asfálticos tiveram seus valores de fator de emissão corrigidos, onde verificou-se a diferença entre o fator de emissão do CAP50/70 obtido em literatura científica para o valor apresentado pela PETROBRAS, e aplicou-se a mesma redução absoluta para os demais ligantes. Dessa forma, os fatores de emissão para os ligantes nesta configuração seriam: 264 kgCO<sub>2</sub>eq/t para CAP 50/70; 389,9 kgCO<sub>2</sub>eq/t para AMP 60/85; 293,74 kgCO<sub>2</sub>eq/t para AB-08; e 515,8 kgCO<sub>2</sub>eq/t para o ligante HiMA.

Nesse novo cenário de emissões, todas as alternativas em pavimentos de CCP foram mantidas com o fator de emissão de CO<sub>2</sub>, apresentado pela ABCP, de 564 kgCO<sub>2</sub>eq/t para o CP produzido, e os consumos de materiais para todas as estruturas, sejam rígidas ou flexíveis, seguiram os projetos reais analisados. Os resultados de emissões podem ser observados na Figura 45.

<sup>51</sup> Apresentação da Dra. Montserrat Motas Carbonell no evento online “27º Encontro do Asfalto” do Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP) no dia 07/08/25 ([https://www.youtube.com/watch?v=\\_tiLsFLhI0M](https://www.youtube.com/watch?v=_tiLsFLhI0M)).

Figura 45 - Valores de emissão de tCO<sub>2</sub>eq/km das estruturas avaliadas – consumos ajustados + Fator de emissão ABCP + Fator de emissão Petrobras



Fonte: Autores

Para o cenário construído com os fatores de emissão apresentado pelos principais representantes do setor de produção de CAP e CP do Brasil, os valores finais apresentados de emissão são menores que aqueles encontrados a partir do uso da literatura científica.

Ao final destas análises, em que foram “consideradas as condições menos emissivas informadas pelas indústrias nacionais”, as alternativas em pavimentos asfálticos de comportamento flexíveis continuam a emitir significativamente menos GEE para todos os tráfegos analisados, exceto quando comparados a pavimentos semirrígidos no tráfego de 5,0E+08. As variações finais de todas as soluções, comparadas ao pavimento CCP em toda a plataforma da via, podem ser visualizadas na Tabela 49.

Tabela 49 – Síntese das diferenças percentuais de emissão de CO<sub>2</sub>eq em relação aos pavimentos rígidos com acostamento em CCP – Considerando fatores de emissões informados pela ABCP e PETROBRAS

N <sub>USACE</sub>	CA-50/70-DNER	CA-50/70-Med	CA-60/85-Med	CA-AB8-Med	CA-HiMA-Med	CA-60/85-Flex	SR-HiMA	SR-INV-HiMA
5x10 <sup>6</sup>	-62,44%	-70,72%	-66,19%	-65,73%	-67,00%	-	-	-
10 <sup>7</sup>	-62,46%	-64,07%	-61,83%	-63,51%	-68,38%	-	-	-
5x10 <sup>7</sup>	-	-	-50,12%	-52,96%	-61,15%	-57,92%	-	-
10 <sup>8</sup>	-	-	-40,41%	-40,73%	-52,90%	-49,27%	-38,79%	-41,02%
5x10 <sup>8</sup>	-	-	-32,01%	-30,14%	-45,75%	-	-41,33%	-42,57%

Nota: Desconsiderando a utilização de CAP 50/70 para tráfegos maiores que 10<sup>7</sup>.

Fonte: Autores

Em média, considerando os fatores de emissões mais recentes informados pela ABCP e pela PETROBRAS, para o CP e o ligante asfáltico, os pavimentos asfálticos flexíveis emitem, em média, 66,42%, 64,05%, 55,54%, 45,83% e 35,97% menos GEE para solicitações de tráfego em N<sub>USACE</sub> de 5,0E+06, 1,0E+07, 5,0E+07, 1,0E+08 e 5,0E+08, respectivamente, quando comparados a uma solução em CCP com acostamento em CCP dimensionado para o mesmo tráfego.

## 4 CONCLUSÕES

De acordo com o delinear metodológico proposto e os resultados obtidos, as principais conclusões são apresentadas a seguir, relacionadas às análises orçamentárias e emissões de CO<sub>2</sub>, respectivamente.

### 4.1 Análises Orçamentárias

- a) Os métodos empírico-mecanicistas, como o MeDiNa e o FlexPAVE<sup>TM</sup>, possibilitam avaliar o impacto dos ganhos de desempenho dos ligantes modificados nos preços estimados de construção dos pavimentos asfálticos, sendo fundamentais para uma análise mais realista dessas estruturas;
- b) Apesar de as misturas com ligante modificado apresentarem maiores preços unitários em relação à mistura com ligante convencional, o melhor desempenho à fadiga das misturas com asfaltos especiais possibilitou a redução das espessuras de revestimento, gerando estruturas mais econômicas que as dimensionadas com CAP 50/70 para a maioria das condições de tráfego, à exceção de  $N_{USACE}$  igual a  $5,0E+06$ .
  - i. Para os tráfegos entre  $1,0E+07$  e  $5,0E+08$ , as estruturas de pavimentos asfálticos dimensionadas pelo MeDiNa com asfalto do tipo HiMa foram as que apresentam os menores preços finais estimados, seguidas das misturas com asfalto borracha e AMP 60/85, respectivamente;
- c) Para as condições de tráfego até  $N_{USACE}=5,0E+07$ , os pavimentos rígidos com acostamento asfáltico apresentaram os menores valores estimados por km quando comparados às estruturas rígidas com acostamento em CCP. Todavia, para tráfegos iguais ou superiores a  $1,0E+08$ , as soluções em pavimento rígido com acostamento asfáltico (utilizando mistura asfáltica com CAP 50/70) apresentaram maiores valores que as estruturas com acostamento em CCP;
- d) Para as condições de tráfego  $N_{USACE}$  até  $5,0E+07$  e as premissas adotadas no presente estudo, a implantação de pavimentos asfálticos se mostrou mais econômica em todos os cenários avaliados (exceto para tráfego de  $5,0E+07$ , com AMP 60/85, dimensionada com o MeDiNa e considerando os consumos do SICRO);
- e) Já para o tráfego  $N_{USACE}=1,0E+08$ , visualizou-se uma tendência de maior proximidade entre os valores estimados para o pavimento rígido e pavimentos asfálticos, sendo necessária a utilização de ligantes de alto desempenho para viabilizar economicamente a implantação de pavimentos asfálticos frente aos pavimentos em CCP;



- f) Para o tráfego  $N_{USACE}=5,0E+08$ , os pavimentos em CCP apresentaram os menores preços estimados de implantação por quilômetro em comparação aos pavimentos asfálticos, para todos os cenários analisados;
- g) Para tráfegos iguais ou maiores a  $N_{USACE}=1,0E+08$ , as estruturas semirrígidas apresentaram os menores valores estimados de implantação (em comparação aos pavimentos em CCP e asfálticos). Contudo, estudos mais avançados são necessários para a calibração dos modelos utilizados nesse tipo de estrutura;
- h) A prática adotada na maioria dos projetos de pavimentos em CCP licitados ultimamente no país (sem camada granular abaixo do CCR) pode viabilizar economicamente a implantação de pavimentos rígidos para níveis de tráfego a partir de  $N_{USACE}=5,0E+07$ .
  - i. Contudo, reforça-se a opinião dos autores deste estudo, em convergência à prática construtiva adotada até pouco tempo, inclusive descrita em Balbo (2009), sobre a importância de considerar o emprego de sub-base granular para prover capacidade drenante ao pavimento e, assim, evitar ruptura precoce da estrutura;
  - i) Os Sistemas de Custos utilizados para definição dos preços estimados, como o SICRO por exemplo, não são tabelas rígidas. Diante disso, estudos para avaliar diferentes soluções de pavimentação devem considerar as particularidades locais, especialmente em relação aos consumos de materiais, buscando aproximar o orçamento das condições reais da provável obra.
    - i. A adoção dos consumos de ligantes asfálticos e cimento indicados nas composições do SICRO, sem os devidos ajustes, pode não representar adequadamente os preços estimados para as diferentes soluções, cabendo este ajuste aos orçamentistas.

## 4.2 Análises de Emissões de CO<sub>2</sub>eq

- a) As emissões de CO<sub>2</sub>eq nos pavimentos com CCP e CCR foram altamente impactadas pelas emissões da produção do Cimento Portland, que respondeu por 66,7% das emissões totais. Quando observados os grupos de emissões, o estágio A1-A3 de produção dos materiais contabilizou 83,5% do total emitido, o transporte para obra (A4) 14,2% e a execução do pavimento (A5) 2,3%, todos para solução considerando o tráfego de  $N = 1,0E+08$ . Os demais níveis de solicitação guardam semelhança com estes valores;
- b) A solução de pavimento asfáltico analisada para  $N = 1,0E+08$  com mistura asfáltica constituída de ligante AMP 60/85 inferiu que o ligante posto entregue na usina foi responsável por 14,9% das emissões totais do pavimento construído. Neste cenário, o maior

contribuinte no total de emissões foi o óleo para os queimadores da usina, que representou 24,4% do total emitido. Ao observar os estágios separadamente, os grupos A1-A3, A4 e A5 contribuíram com aproximadamente 63%, 34% e 3%, respectivamente;

- c) A investigação das emissões de GEE demonstrou que os pavimentos asfálticos emitem significativamente menos CO<sub>2</sub>eq do que as soluções em pavimento rígido de CCP. A magnitude da variação de emissão entre essas soluções é dependente dos níveis de solicitações de tráfego analisadas. Em todos os espectros de tráfego avaliados (5,0E+06 a 5,0E+08), as soluções asfálticas foram mais sustentáveis em termos de potencial de aquecimento global na fase de construção do pavimento.
  - i. Em regra geral, quanto menor o tráfego, mais as soluções asfálticas se destacam. Em termos médios, os pavimentos flexíveis foram 71,5%, 69,4%, 61,8%, 53,6% e 45% menos emissores de CO<sub>2</sub>eq para os tráfegos de 5,0E+06, 1,0E+07, 5,0E+07, 1,0E+08 e 5,0E+08, respectivamente, quando comparados ao pavimento rígido em CCP;
- d) A escolha por diferentes ligantes asfálticos leva a variações nos valores finais de emissão de cada solução utilizada. Os ligantes modificados por polímero (AMP 60/85) e borracha (AB-08) levaram a espessuras de revestimento inferiores àquelas calculadas para misturas com CAP 50/70. As menores espessuras foram compensadas por fatores de emissões de CO<sub>2</sub>eq mais elevados, o que levou as misturas com ligantes modificados apresentarem emissões totais por quilometro mais elevadas quando comparadas ao CAP 50/70.
  - i. A este fato, também colaborou com as maiores emissões de GGE a presença de cal em ambas as misturas (AMP 60/85 e AB-08) e o alto teor de ligante na mistura AB-08. Tais fatores demonstram que aliar projetos de dosagem que apresentem o desempenho necessário e com mínima incorporação de cal, podem levar a uma redução da pegada de carbono das soluções com revestimentos asfálticos;
- e) A mistura com HiMA, que aliou alto desempenho frente à fadiga (impactando em menores espessuras de revestimentos) com um projeto sem uso de cal, foi a que apresentou os menores valores de emissão de CO<sub>2</sub>eq entre todas as alternativas do estudo para todos os tráfegos acima de 1,0E+07;
- f) Em um futuro mercado de carbono, as emissões de CO<sub>2</sub>eq podem ser fatores importantes na definição da solução de pavimentação utilizada. As soluções em pavimentação asfáltica, por emitirem menores níveis de CO<sub>2</sub>eq apresentam vantagem neste contexto específico.

### 4.3 Considerações Finais

A pesquisa ora consolidada, evidencia a importância da modificação dos asfaltos para a promoção de melhor desempenho das misturas asfálticas que se confirmada em campo, propiciará menores custos de implantação da estrutura viária aliada a menores emissões de GEE, sobretudo para tráfegos mais elevados.

Os pavimentos de CCP mostraram-se competitivos para o tráfego de  $N = 1,0E+08$  e mais econômicos para o nível de carregamento rodoviário mais elevado considerado no estudo. Contudo, pavimentos com revestimentos asfálticos e bases (ou sub-bases) cimentadas, chamados de pavimentos semirrígidos, mostraram-se ainda mais econômicos para estes níveis de carregamento. Salienta-se a necessidade de avanços técnicos e científicos para melhor compreensão acerca de aspectos construtivos e do desempenho em campo destas estruturas. As chamadas bases asfálticas, ainda incomuns no cenário nacional, configuram-se em soluções que também merecem ser consideradas.

Julga-se que a maior parte da malha viária a ser implantada no Brasil encontra-se com tráfego não muito superior a  $N = 5,0E+07$ , condição em que os pavimentos asfálticos se mostram muito competitivos.

Estudos que buscam avaliar comparativamente os custos entre distintas alternativas devem, obrigatoriamente, avaliar os teores reais de asfalto e cimento Portland aplicados, evitando, assim, importantes distorções em suas conclusões.

As emissões de GEE mostram-se sempre inferiores para as soluções em concreto asfáltico. Novos estudos devem ser conduzidos para também avaliar o impacto do desempenho dos pavimentos sobre a irregularidade longitudinal dos pavimentos. Este índice de qualidade ao rolamento do pavimento impacta a consumo de combustíveis dos veículos e suas emissões de  $CO_2eq$ . O emprego de material asfáltico fresado (RAP) nas misturas e/ou de misturas mornas podem reduzir as emissões de GEE.

Por fim, mas não menos importantes, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das alternativas deve ser a meta dos pesquisadores e dos gestores do setor rodoviário, contemplando aspectos econômicos, sociais e ambientais, considerando desde a concepção da estrutura até os impactos de sua reconstrução, uma vez que os pavimentos são estruturas finitas.

## 5 REFERÊNCIAS

- Albernaz, C. A. V. (1997). **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. 107 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Almeida Jr, P. O., Boeira, F. D., Specht, L. P., Cervo, T. C., Pereira, D. da S., Centofante, R., Barboza Jr, V. dos S., & Correia e Silva, C. F. (2018). **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Transportes, 26(2), 1–15. <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i2.1407>.
- Andrew, R. M. (2018). **Global CO2 emissions from cement production**. Earth System Science Data, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- ANP – Agência Nacional do Petróleo (2025) – **Painel Dinâmico – Emissões de gases do efeito estufa** - Link <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiazGUyMmM4ODYtNGQ3YS00NmE3LTg2ODktMWRiNDRiNjk4N2VlIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtyNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkyMyJ9>. Acesso em 09/06/2025.
- Alzard, M. H.; M. A. Maraqa; R. Chowdhury; M. Sherif; T. I. Mauga; F. B. Albuquerque e K. N. Aljunadi (2019) **RoadCO2: A web-based tool for estimation of greenhouse gas emissions of road projects**. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), p. 1-6. DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714341.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2009). NBR ISO 14040: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2009). NBR ISO 14044: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e diretrizes**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2012). NBR ISO 21930: **Sustentabilidade em edificações e obras de engenharia civil - Princípios e requisitos para declarações ambientais de produtos (DAPs) de produtos e serviços para construção**. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 16018. (2011). **Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Brasília – DF.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 16505. (2016). **Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Brasília – DF.
- Balbo, J. T. (1989). **Aplicação do método dos elementos finitos na avaliação estrutural de pavimentos rígidos rodoviários**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 173p., São Paulo.
- Balbo, J. T. (1996). **Practical Considerations for Concrete Pavement Design Based on Numerical Model**. 1er Congreso Interamericano de Pavimentos Rígidos, 1. Proceedings, Vol. 3. FICEM, Buenos Aires. pp. 1 – 15.
- Balbo, J. T. (2007). **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos.
- Balbo, J. T. (2009). **Pavimentos de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos.
- Balbo, J. T. (2003). **Avaliação Crítica de Técnicas de Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples**. Anais do V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, PEF/PCC, ISBN 85-86686-19-0, São Paulo.
- Barbieri, D. M., Lou, B., Wang, F., Hoff, I., Wu, S., Li, J., Vignisdottir, H. R., Bohne, R. A., Anastasio, S., & Kristensen, T. (2021). **Assessment of carbon dioxide emissions during production, construction and use stages of asphalt pavements**. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.
- Barry, C., Naresh, A., Taylor, W., & MacDonald, J. (2024). **Analyzing the Petroleum Asphalt Binder Supply Chain under Energy Transition Scenarios**. Asphalt Intitute Foundation Wood Mackenzie.

Blomberg, T., Bernard, F., & Southern, M. (2020). **Life Cycle Inventory. Catalysis from A to Z**, June, 13–15. <https://doi.org/10.1002/9783527809080.cataz09774>

Brown A. **Carbon footprint of HMA and PCC pavements**. Proceedings of International Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio; 2009.

Bonfim, S. L. M., Silva, M. R. da, Lima, M. R. de, Lima, A. F., & Santos, B. M. dos. (2024). **Análise do custo-benefício de implantação e manutenção entre pavimentos rígido e flexível: estudo de caso para Rodovia Expresso Porto – RO**. Revista Caribeña De Ciencias Sociales, 13(8), e4251. <https://doi.org/10.55905/rcssv13n8-013>.

Carvalho, C. H. R. de. (2011). **Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Motorizado De Passageiros Nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. Ipea, 42. [http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td\\_1606.pdf](http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf)

Cavalet, V. N.; Luvizão, G.; Nienov, F. A.; ZAMPIERI, L. Q. (2019). **Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de Cimento Portland aplicado em rodovia de alto tráfego**. 33º ANPET. Balneário Camboriú.

Chehovits, J., & Galehouse, L. (2010). **Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements**. First International Conference on Pavement Preservation, 27–42.

Childs, L. D. (1947). **A Study of Slab Action in Concrete Pavements under Static Loads**. Proceedings. Highway Research Board, Washington, D.C. pp. 64 – 84.

Cement Association of Canada (2021). **Low Carbon Cement and Concrete Alternatives**. Acesso em 07/07/2025. [https://cement.ca/expertise\\_center/cement-and-concrete-materials/low-carbon-cement-concrete-alternatives/](https://cement.ca/expertise_center/cement-and-concrete-materials/low-carbon-cement-concrete-alternatives/).

Custódio, D. A. da S. (2022). **Caracterização à fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral e comparação com os resultados do ensaio de tração-compressão**. Universidade Federal de Santa Maria.

Darter, M. I.; Hallin, J.; Khazanovich, L.; Tayabji, S. E Snyder, M. (1998). **Development and Calibration of a Mechanistic-Empirical Design Procedure for Rigid Pavements**. 4º International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements. Proceedings. CROW, Buçaco. 15p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. (2023). **Manual de Utilização do programa MeDiNa versão 1.1.9**. Disponível em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-versao-1-1-9>

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 134/2018 (2018). **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 135/2018 (2018). **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 179/2018 (2018). **Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 181/2018 (2018). **Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT 183/2018 (2018). **Pavimentação asfáltica-Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada-Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT. 184/2018 (2018). **Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Vigário Geral - Rio de Janeiro/RJ

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT. 434/2021/2018 (2021). **Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasília – DF.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1994). **DNER-ME 053/94:** Misturas betuminosas - percentagem de betume. Rio de Janeiro: DNER.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (1997). **DNER-PRO 277/97:** Metodologia para controle estatístico de obras e serviços. Rio de Janeiro: DNER.

Eurobitume. (2025). **Life Cycle Assessment4.0 for bitumen** - Summary and comparative analysis on theGlobal Warming Potential indicator. [www.eurobitume.eu](http://www.eurobitume.eu)

Faccin, C. (2018). **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande Do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.

Fernandes, I. S. (2009). **Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada “in situ”.** 199 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

Ferreira, E. C. F., Junior, L. C. F. da S., Grapp, P. L. da C. V.-., Cunha, R. R. da, & Rabelo, A. C. A. de L. (2022). **Análise do desempenho do traço de concreto compactado com rolo (CCR), aplicado no sistema bus rapid transit (BRT) de Belém-PA, estudo de caso.** Brazilian Journal of Development, 8(6), 47244–47265. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-296>.

Franco, F. A. C. P. (2007). **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** 315 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

Franco, F. A. C. P.; Motta, L. M. G. (2018). **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos.** Relatório Parcial IV (A). Projeto DNIT TED nº 682/2014. Processo nº 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro/RJ.

Fritzen, M. A. (2016) **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.** 286 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

Gatiganti, S (2024). **Comparative Life Cycle Assessments of Alternate Designs Evaluating environmental impacts of pavement options.** Asphalt Technology News (Fall).

Guimarães, A. C. R. (2009). **Um método mecanístico-empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** 367 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

Guo, C., & Xu, J. (2021). **Carbon Emission Calculation Methods for Highway Tunnel Construction.** In Carbon Emission Calculation Methods for Highway Tunnel Construction. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5308-7>

Hanson, C., Noland, R., & Cavale, K. (2012). **Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction.** Transportation Research Record, 2287, 174–181. <https://doi.org/10.3141/2287-21>

Imbabi, Carrigan and McKenna (2012). **Trends and developments in green cement and concrete technology.** International Journal of Sustainable Built Environment. Pgs 194-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>.

Hakkinen, T., Makela, K., (1996). **Environmental adaption of concrete: Environmental impact of concrete and asphalt pavements.**



Horvath, A., Hendrickson, C., (1998). **Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements**. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 1626, 105–113. <https://doi.org/10.3141/1626-13>.

Ioannides, A. M.; Khazanovich, L. e Becque, J. L. (1992). **Structural Evaluation of Base Layers in Concrete Pavement Systems**. Transportation Research Record 1370. Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 20 - 28.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (2018)** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Inyim, P., Pereyra, J., Bienvenu, M., Mostafavi, A., (2016). **Environmental assessment of pavement infrastructure: a systematic review**. J. Environ. Manage. 176, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>.

Kalinski C. (2017). **Comparativo econômico entre estruturas de pavimentação rígida e flexível com aplicação de conceitos da análise do custo no ciclo de vida para o projeto de uma via**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco.

Khazanovich, L; Wang, Q. C. (2007). **MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program**. TRR 2037. Washington (EUA).

Kok, A. W. M. (1990). **A PC Program for the Analysis of Rectangular Pavements Structures. 2º International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements**. Proceedings. CROW, Sigüenza. pp. 113 - 120.

Krau, M., Rayssa, C., Rodrigues, R., & Mota, B. C. (2023). **Comparação do desempenho ambiental de diferentes usinas asfálticas utilizando dados secundários e avaliação do ciclo de vida**. Congresso de Pesquisa e Ensino Em Transportes, Santos-SP

Kucukvar M, Tatari O. (2012) **Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements**. Transportation Research Board Part D;17:86–90.

Lehne, J., & Preston, F. (2018). **Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete**, The Royal Institute of International Affairs, Chatham House Report Series. 138. <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>.

Ma, F.; A. Sha; R. Lin; Y. Huang e C. Wang (2016). **Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: A case study in China**. International journal of environmental research and public health, v. 13(3), p. 1-15. DOI: 10.3390/ijerph13030351

Ma, F., Sha, A., Yang, P., & Huang, Y. (2016). **The greenhouse gas emission from portland cement concrete pavement construction in China**. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>

Medina, J; Motta, L. M. G. (2015). **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro/RJ.

Miller, L., Ciavola, B., & Mukherjee, A. (2024). **EPD Benchmark for National Asphalt Pavement Association**.

Shacat, J., Willis, R., Ph, D., Ciavola, B., Ph, D., & P-, S. I. (2024). **The carbon footprint of asphalt pavements. A reference document for decarbonization**. Nacional Asphalt Pavement Association SIP-109. Greenbelt, MD

Motta, L. M. G. (1991). **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 365 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



Nascimento, L. A. H. (2008). **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 204p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

Nascimento, L. A. H. (2015). **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. 335 p. Tese de Doutorado. North Carolina State University. North Carolina (EUA).

Nunes - Ramos, V. (2021). **Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria.

Older, C. (1924). **Highway Research in Illinois**. Transactions of the ASCE. American Society of Civil Engineers, New York. pp. 1180 – 1224.

Packard, R. G. e Tayabji, S. D. (1985). **New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements**. 3ª International Conference on Concrete Pavement Design. Proceedings. Purdue University, West Lafayette. pp. 225 – 236.

Paulino, B. A. **Introdução à orçamentação de obras rodoviárias**. (2021). Disponível em <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7644/4/M%C3%B3dulo%201%20-%20Considera%C3%A7%C3%B5es%20Gerais%20%281%29.pdf>

PCA (1984). **Thickness Design of Concrete Pavements for Streets and Highways**. Portland Cement Association (PCA), Skokie.

Peng, B. *et al.* **Evaluation system for CO2 emission of hot asphalt mixture**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 2, n. 2, p. 116 124, 2015.

Pereira, R. S. (2022). **Investigação do custo-benefício da utilização de pavimentos asfálticos e de concreto de cimento portland orçados através do SICRO**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

Peterson, D. E. (1985). **Life-cycle cost analysis of pavements**. Transportation Research Board. Disponível em [https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_122.pdf](https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_122.pdf)

Pickett, G. e Ray, G. K. (1951). **Influence Charts for Concrete Pavements**. Transactions of the ASCE. American Society of Civil Engineers, New York. pp. 49 – 73.

Pitta, M. R. (1996). **Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método da PCA/1984**. ET-97. 2.ed. ABCP, São Paulo.

Raffler, A. (2023). **Análise do desempenho à fadiga de ligantes e misturas asfálticas densas em função da origem e da modificação por polímero**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Santero NJ, Masanet E, Horvath A. (2011). **Life-cycle assessment part I: critical review**. Resour, Conserv Recycl 2011;55:801–9.

Santoro, J. F., & Kripka, M. (2016). **Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul**. Ambiente Construído, 16(2), 35–49. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000200078>.

Schmalzer, P. N. (2014) **Backcalculation Software: A view from the trenches**. Falling Weight Deflectometer Users Group (FWDUG) Meeting. Indianapolis (EUA).

Severi, A. A. (2002). **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 256p, São Paulo.

Silva, C. S. de S. da, Nogueira, J. R. S., Silva, M. G., Ortolan, V. de K., & Mancio, M. (2014). **Avaliação Ambiental de Processos de Pavimentação Rígida e Flexível a Partir da Análise do Ciclo de Vida**. IX Simpósio Internacional de Quali, 16.

Simm Júnior, G. P. (2007). **Estudo do comportamento de estruturas e pavimentos com materiais alternativos visando à redução dos custos de pavimentação no estado de Santa Catarina**. 333 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

Souza, C. R. R. R., Krau, M. M. T., Caldas, L. R., Nascimento, L. A. H. do, & Aragão, F. T. S. (2022). **Avaliação do ciclo de vida (acv) de pavimentos asfálticos reciclados com diferentes teores de reclaimed asphalt pavement (RAP)**. Congresso Iberoamericano Del Asfalto - XXI CILA.

Stripple, H., (2001). **Life cycle assessment of road - A pilot study for inventory analysis**. <https://doi.org/10.1177/0734242X10379146>.

Tia, M.; Armaghani, J. M.; Wu, C.L.; Lei, S. e Toye, K. L. (1987). **FEACONS III Computer Program for Analysis of Jointed Concrete Pavements**. Transportation Research Record 1136. Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 12 - 22.

Trichês, G. (1993). **Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação: Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento**. Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.bdita.bibl.ita.br/>>

Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). **Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72(June 2015), 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>

Treybig, H. J.; Hudson, W. R. e McCullough, B. F. (1971). **Effect of Load Placement on Rigid Pavement**. Proceedings of the ASCE (Transportation Engineering Journal). American Society of Civil Engineers, New York. pp. 681 – 702.

Wang, X.; Z. Duan; L. Wu e D. Yang (2015). **Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China**. Journal of Cleanear Production, v. 103, p. 705-714. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.030.

Wu, C. L. e Tia, M. (1989). **Development of a Rational Thickness Design Method for Rigid Pavements**. Transportation Research Record 1227. Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 205 - 218.

Ullidtz, P. (1987). **Pavement Analysis**. Elsevier. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo.

Vello, M. S.; Barreto, T. B. Z.; Pacheco, R. F. R. (2024). **Comparativo de custos entre o pavimento rígido não armado e o pavimento flexível em cbuq para variados níveis de tráfego**. Trabalho Final de Curso da Pós-Graduação lato sensu em Engenharia de Infraestrutura Urbana. Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória.

Vestena, P. M. (2021). **Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAfex, HiMA e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento**. Universidade Federal de Santa Maria.

Zapata, P.; Gambatese, J.A. **Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction**. J. Infrastr. Syst. 2005, 11, 9–20.

Zhou, X.; X. Zhang; Y. Zhang *et al.* (2022) **Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province**. Construction & Building Materials, v. 315, p. 125738. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125738.