

**ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico**

RELATÓRIO FINAL

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS E MISTURAS ASFÁLTICAS
ELABORADAS NO CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS DA CCR**

CCR Rio SP

31/10/2025

SUMÁRIO

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	4
Título do projeto	4
Resumo do tema, com a identificação do problema.....	4
Palavras-chave	4
Justificativas para o desenvolvimento do projeto.....	4
Objetivos geral e específicos	5
Organização do trabalho	5
Período de desenvolvimento do projeto	6
Local de execução	6
Equipe executora	7
2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	8
Abordagem Metodológica Principal.....	9
Técnicas de Coleta e Análise de Dados.....	9
Ferramentas de Software e Modelagem	10
Estrutura da Análise de Ciclo de Vida (ACV)	10
Métodos de Verificação e Validação.....	11
Integração entre Desempenho Técnico e Ambiental.....	12
Capacitação e Transferência de Conhecimento.....	12
Referências Metodológicas e Ferramentas de Gestão	12
Síntese da Abordagem Metodológica.....	13
3. DETALHAMENTO DAS ETAPAS DO PROJETO	13
• ETAPA A: Seleção e coleta de dados das pesquisas de pavimentos.....	13
• ETAPA B: Coleta de informações sobre a aplicação em campo	13
• ETAPA C: Elaboração de banco de dados	14
• ETAPA D: Análise de desempenho e desenvolvimento de dashboards	14
• ETAPA E: Aquisição e treinamento em SimaPro e ACV	15
• ETAPA F: Aplicação da técnica de ACV	15
• ETAPA G: Verificação com o software MeDiNa.....	17
• ETAPA H: Elaboração de manual para uso do SimaPro	17
• ETAPA I: Consolidação e elaboração dos relatórios finais	18

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS	18
• Alcance dos Objetivos	18
• Avaliação dos Métodos e Técnicas Adotadas	19
• Avaliação da Utilidade Prática dos Resultados e Produtos	19
• Vantagens, Desvantagens e Melhorias	20
• Viabilidade Econômica e Custo-Benefício	20
• Avaliação dos Produtos Desenvolvidos	21
• Impactos Ambientais Comparados	22
• Produtos Gerados pelo Projeto	23
• Transferência de Tecnologia e Conhecimento	23
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
6. ANEXOS	24

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

Nesta seção, são apresentados os elementos fundamentais que caracterizam o projeto de pesquisa e desenvolvimento, desde sua concepção e justificativa até sua estrutura organizacional e cronológica.

Título do projeto

Avaliação do ciclo de vida de materiais e misturas asfálticas elaboradas no centro de pesquisas rodoviárias da CCR.

Resumo do tema, com a identificação do problema

O propósito central do projeto é sistematizar um vasto conjunto de dados técnico-operacionais de materiais e misturas asfálticas, que foram estudados no laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR e aplicados em intervenções de pavimentação na rodovia ao longo dos últimos 10 anos de concessão. A partir dessa base de dados consolidada, o projeto avalia os impactos ambientais associados ao ciclo de vida dessas soluções, gerando insumos objetivos para a tomada de decisão, padronização de processos e a melhoria contínua das tecnologias de pavimentação empregadas.

O problema central identificado é a ausência de um banco de dados unificado e rastreável que consolide o acervo técnico produzido pelo CPR/CCR. Essa lacuna limita a capacidade de realizar comparações consistentes entre diferentes alternativas de restauração de pavimentos e restringe o aprendizado institucional a partir do histórico de desempenho observado em campo. A falta de uma análise integrada entre o desempenho técnico e o impacto ambiental dificulta a seleção de soluções que sejam, ao mesmo tempo, duráveis e sustentáveis.

Palavras-chave

Apresentam-se 5 palavras-chave que definem os eixos temáticos do projeto:

- Análise de Ciclo de Vida (ACV)
- Misturas Asfálticas
- Pavimentação Rodoviária
- Emissões de GEE
- Desempenho de Pavimentos

Justificativas para o desenvolvimento do projeto

A justificativa para a execução deste projeto fundamenta-se em três pilares complementares:

- 1 Organização e Qualidade dos Dados: A necessidade de consolidar e analisar, de forma rastreável, o amplo acervo técnico produzido pelo CPR da CCR ao longo de uma década. A criação de um repositório mestre e de dashboards analíticos permite identificar padrões de desempenho, outliers e boas práticas de maneira transparente, servindo como base para decisões de engenharia e para a governança de ativos de infraestrutura.

- 2 Conformidade Metodológica e Ambiental: A adoção da Análise de Ciclo de Vida (ACV), em conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, assegura a comparabilidade, reprodutibilidade e documentação das hipóteses de modelagem ambiental. Isso permite quantificar os impactos, como as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o consumo de energia, de forma padronizada e reconhecida internacionalmente.
- 3 Integração entre Desempenho, Impactos e Critérios Econômico-Regulatórios: O projeto alinha o desempenho técnico, verificado com o método mecanístico-empírico MeDiNa (DNIT), aos impactos ambientais (ACV) e a critérios de gestão consagrados (como o HDM-4). Essa abordagem integrada contribui para reduzir incertezas em futuras escolhas de soluções de pavimentação e se alinha ao marco regulatório da ANTT, que valoriza o uso de evidências técnico-científicas para orientar as decisões das concessionárias e do poder concedente.

Objetivos geral e específicos

Objetivo Geral

Avaliar o ciclo de vida de materiais e de misturas asfálticas estudadas no laboratório do CPR e aplicadas em intervenções na rodovia ao longo dos últimos 10 anos de concessão da CCR Nova Dutra, integrando desempenho técnico e impactos ambientais para apoiar a tomada de decisão.

Objetivos Específicos

- Compilação e Banco de Dados: Compilar as informações de materiais e misturas asfálticas estudadas no CPR e aplicadas na rodovia, estruturando-as em um banco de dados único.
- Análise de Desempenho: Analisar o desempenho de materiais e misturas (laboratório e campo) das intervenções executadas, por meio de dashboards interativos.
- ACV das Intervenções: Analisar o ciclo de vida (ACV) das intervenções executadas com as misturas estudadas.
- Quantificação de Impactos Ambientais: Verificar os impactos ambientais (emissões de CO₂-eq e consumo de energia) decorrentes da utilização das diferentes misturas asfálticas.
- Verificação com MeDiNa: Verificar se o software MeDiNa apresenta resultados de desempenho similares aos observados em campo.
- Capacitação Técnica: Realizar o treinamento de técnicos da CCR para o uso do software SimaPro na aplicação da ACV em projetos de pavimentação.

Organização do trabalho

O projeto foi estruturado em um conjunto de etapas sequenciais e interdependentes, conforme detalhado na tabela abaixo:

Etapas	Descrição	Duração
A	Seleção e coleta de dados das pesquisas de pavimentos desenvolvidas pela CCR NovaDutra.	2 meses
B	Coleta de informações sobre a aplicação das misturas asfálticas em campo.	2 meses
C	Elaboração do banco de dados consolidado com as informações das etapas A e B.	3 meses
D	Análise dos dados com a calculadora de emissões.	2 meses
E	Aquisição do software SimaPro, da base de dados Ecoinvent e treinamento da equipe.	2 meses
F	Aplicação da técnica de ACV utilizando os dados do banco de dados.	6 meses
G	Demonstração de exemplos de aplicação dos resultados no software MeDiNa.	2 meses
H	Elaboração de um manual de procedimento para uso do SimaPro em pavimentação.	2 meses
I	Consolidação dos resultados e elaboração dos relatórios finais do projeto.	3 meses

Período de desenvolvimento do projeto

- Data de início: 01/08/2023
- Data de término: 31/10/2025

Local de execução

As atividades do projeto foram desenvolvidas em múltiplos locais, de acordo com a natureza de cada etapa:

- Atividades Laboratoriais: Realizadas principalmente no laboratório do LESFER/UFRJ, localizado no Rio de Janeiro, RJ, e no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR.
- Trechos Experimentais: As intervenções e coletas de dados de campo ocorreram em diversos trechos da Rodovia Presidente Dutra (BR-116), sob concessão da CCR Nova Dutra. Os detalhes específicos de localização (quilometragem, pista, etc.) de cada intervenção estão documentados nos anexos do projeto.

Equipe executora

O desenvolvimento do projeto contou com uma equipe multidisciplinar de pesquisadores e estudantes, sob a coordenação geral do Professor Marcelino Aurélio Vieira da Silva, vinculado ao Programa de Engenharia de Transportes (PET) da COPPE/UFRJ. A execução do projeto foi uma colaboração entre a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por meio do seu programa de pós-graduação de excelência, e a concessionária CCR Nova Dutra.

A equipe foi composta por profissionais com vasta experiência acadêmica e de mercado, além de jovens pesquisadores em formação, garantindo uma abordagem completa e inovadora para os desafios do projeto. A seguir, são detalhados os membros da equipe executora.

Coordenação

O Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc., coordenou as atividades do projeto. Professor do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ e bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq, possui vasta experiência na área de Planejamento de Transportes, com doutorado em Engenharia de Transportes pela UFRJ.

Pesquisadores Colaboradores

A Professora Sandra Oda, D.Sc., atuou como pesquisadora colaboradora. Professora associada do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da UFRJ, possui doutorado em Engenharia de Transportes pela USP e tem um histórico de colaboração em projetos e treinamentos com a CCR Nova Dutra. Sua experiência em pavimentação e sistemas de gerência foi fundamental para o projeto.

Corpo Discente

A equipe contou com a participação ativa de estudantes de pós-graduação e graduação, que contribuíram significativamente para as atividades de pesquisa e desenvolvimento. A participação destes estudantes é um pilar importante na formação de recursos humanos qualificados para o setor de transportes.

Pós-Graduação

- Camila Espirito Santo Almeida: Aluna de mestrado do Programa de Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ).
- Claudeny Simone Alves Santana: Aluna de doutorado do Programa de Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ), com bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq.
- Felipe Costa Dias: Mestre em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ, com bolsa da CAPES durante seus estudos.
- Pedro Henrique Paixão Batista: Aluno de mestrado em Engenharia de Transportes pela UFRJ, com bolsa da CAPES.
- Victor Hugo Molinaro Fonseca: Aluno de mestrado profissional em Projeto de Estruturas na UFRJ e bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq.

- Matheus Neiva Dias: Aluno de mestrado do Programa de Engenharia de Transportes (PET/COPPE/UFRJ).

Resumo da Equipe

A tabela a seguir resume a composição da equipe executora do projeto:

Nome Completo	Titulação/Nível	Vínculo Institucional	Função no Projeto
Marcelino Aurélio Vieira da Silva	Doutorado	COPPE/UFRJ	Coordenador Geral
Sandra Oda	Doutorado	POLI/UFRJ	Pesquisadora
Claudeny Simone Alves Santana	Doutoranda	COPPE/UFRJ	Pesquisadora Discente
Felipe Costa Dias	Mestrado	COPPE/UFRJ	Pesquisador Discente
Pedro Henrique Paixão Batista	Mestrando	UFRJ	Pesquisador Discente
Camila Espirito Santo Almeida	Mestranda	COPPE/UFRJ	Pesquisadora Discente
Victor Hugo Molinaro Fonseca	Mestrando	UFRJ	Pesquisador Discente
Matheus Neiva Dias	Graduação	UFRJ	Pesquisador Discente

É importante ressaltar que, embora os currículos mencionem bolsas de agências de fomento como CNPq e CAPES, não foi possível identificar, a partir dos documentos fornecidos, quais estudantes tiveram bolsas remuneradas especificamente com os recursos do RDT (Recursos para o Desenvolvimento Tecnológico).

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Nesta seção, são apresentados os métodos e as técnicas empregadas para o desenvolvimento do projeto, abrangendo desde a abordagem metodológica principal até as ferramentas de software e normas técnicas que guiaram as análises.

Abordagem Metodológica Principal

A metodologia central do projeto é a Análise de Ciclo de Vida (ACV), uma técnica normatizada e reconhecida internacionalmente para avaliar os impactos ambientais potenciais de um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. A abordagem segue estritamente os princípios e a estrutura definidos pelas normas da ABNT, garantindo a robustez e a transparência dos resultados:

- ABNT NBR ISO 14040:2009: Estabelece os princípios e a estrutura da ACV, incluindo as fases de definição de objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), avaliação de impacto (AICV) e interpretação.
- ABNT NBR ISO 14044:2014: Fornece os requisitos e as orientações detalhadas para a condução de uma ACV, assegurando a consistência e a qualidade do estudo.

O escopo da ACV no projeto abrange desde a extração de matérias-primas, passando pelo transporte e produção das misturas asfálticas, até a sua aplicação na rodovia e o desempenho em serviço.

Técnicas de Coleta e Análise de Dados

A primeira fase do projeto consistiu em uma extensa coleta de dados, que foram posteriormente organizados em um banco de dados estruturado. As principais técnicas e fontes de informação foram:

- Coleta de Dados Primários: Informações sobre dosagens de misturas, ensaios de laboratório, registros de obras (localização, espessura, data), logística de produção e aplicação, e dados de desempenho em campo (IRI, trincamento, etc.) foram coletados diretamente dos arquivos e sistemas da CCR Nova Dutra e do CPR.
- Análise de Dados e Visualização: O processamento, a análise e a visualização dos dados foram realizadas por meio da calculadora desenvolvida, que integra em um único ambiente o banco de dados estruturado, os modelos de cálculo e os mecanismos de consolidação de resultados. Essa ferramenta permite a análise comparativa do desempenho técnico e ambiental das misturas por família, trecho e período, transformando dados brutos em indicadores diretamente utilizáveis para tomada de decisão.

Dessa forma, a calculadora atende integralmente ao objetivo originalmente previsto de desenvolvimento de dashboards e análises em ambiente Power BI, incorporando essas funcionalidades em uma solução única e integrada, sem a necessidade de plataformas externas de visualização.

Ferramentas de Software e Modelagem

Para a execução das análises técnica e ambiental, foram utilizadas as seguintes ferramentas de software especializadas:

- SimaPro®: Software líder para a modelagem de ACV, utilizado para construir o inventário do ciclo de vida (ICV) das intervenções de pavimentação e calcular os impactos ambientais. O SimaPro foi alimentado com os dados primários do projeto e dados secundários da base de dados Ecoinvent.
- Base de Dados Ecoinvent: Uma das maiores e mais consistentes bases de dados de inventários de ciclo de vida do mundo, utilizada como fonte para os fatores de emissão e consumo de recursos dos processos de fundo (ex: produção de cimento, geração de eletricidade, etc.).
- MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional): Software desenvolvido pelo DNIT para o dimensionamento e verificação mecanístico-empírica de pavimentos asfálticos. Foi utilizado para confrontar as previsões de desempenho do modelo com o comportamento real observado nos trechos experimentais, validando a coerência entre simulação e campo.
- Calculadora de Emissões: Uma ferramenta desenvolvida em Microsoft Excel foi criada para permitir análises rápidas e integradas, calculando as emissões de GEE e o consumo de energia com base na composição da mistura, distâncias de transporte e parâmetros de processo, e normalizando os resultados pela vida de fadiga do material.

Estrutura da Análise de Ciclo de Vida (ACV)

A aplicação da ACV no projeto seguiu uma estrutura metodológica rigorosa, composta por quatro fases interdependentes:

Definição de Objetivo e Escopo

Nesta fase inicial, foram estabelecidos os objetivos da ACV, a unidade funcional (que permite a comparação entre diferentes alternativas), as fronteiras do sistema (quais processos e etapas do ciclo de vida serão incluídos), os critérios de alocação e as categorias de impacto a serem avaliadas. Para este projeto, a unidade funcional foi definida considerando a funcionalidade do pavimento ao longo de sua vida útil, permitindo comparações justas entre misturas com diferentes desempenhos.

Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A fase de ICV consistiu na coleta e quantificação de todos os fluxos de entrada (matérias-primas, energia) e saída (emissões atmosféricas, resíduos, efluentes) associados a cada processo do sistema. Os dados primários foram coletados diretamente das operações da CCR (consumo de combustível, distâncias de transporte, temperaturas de processo, etc.), enquanto os dados

secundários (fatores de emissão de processos de fundo) foram obtidos da base Ecoinvent. O inventário foi construído no software SimaPro, garantindo a rastreabilidade e a documentação de todas as fontes de dados.

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Na fase de AICV, os dados do inventário foram traduzidos em impactos ambientais potenciais, utilizando métodos de caracterização reconhecidos. As principais categorias de impacto avaliadas foram:

- Mudanças Climáticas: Quantificadas em kg de CO₂ equivalente, representando o potencial de aquecimento global das emissões de gases de efeito estufa.
- Consumo de Energia: Medido em MJ (megajoules), representando a demanda energética total do ciclo de vida.

Essas categorias foram selecionadas por sua relevância para a sustentabilidade de infraestruturas de transporte e por serem amplamente utilizadas em estudos de ACV de pavimentos.

Interpretação

A fase final de interpretação consistiu na análise crítica dos resultados, identificando os processos e materiais que mais contribuem para os impactos, avaliando a sensibilidade dos resultados a diferentes hipóteses e fornecendo recomendações para a tomada de decisão. A interpretação foi realizada de forma integrada com os resultados de desempenho técnico, permitindo uma visão holística das alternativas de pavimentação.

Métodos de Verificação e Validação

Para assegurar a confiabilidade dos resultados, foram aplicadas técnicas de verificação e validação em diferentes etapas do projeto:

- Verificação Mecanístico-Empírica com MeDiNa: Os modelos de desempenho do software MeDiNa foram confrontados com os dados de desempenho real observados nos trechos experimentais da rodovia ao longo dos últimos 10 anos. Essa verificação permitiu avaliar a coerência entre as previsões de projeto e o comportamento em serviço, identificando eventuais desvios e calibrando os modelos quando necessário.
- Análise de Sensibilidade: Foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar como variações nos principais parâmetros de entrada (ex: distâncias de transporte, teor de ligante, vida útil) afetam os resultados de impacto ambiental, permitindo identificar os fatores críticos e as incertezas associadas.

- Controle de Qualidade dos Dados (QA/QC): Procedimentos de garantia e controle de qualidade foram aplicados ao banco de dados, incluindo a verificação de consistência, completude e rastreabilidade das informações.

Integração entre Desempenho Técnico e Ambiental

Uma das principais inovações metodológicas do projeto foi a integração entre a avaliação de desempenho técnico e a avaliação de impacto ambiental. Tradicionalmente, essas análises são realizadas de forma separada, o que pode levar a decisões subótimas. Neste projeto, os resultados de ACV foram normalizados pela vida de fadiga (N) das misturas, obtida a partir do ensaio de viga de 4 pontos, permitindo calcular o "custo ambiental por ciclo de vida útil". Essa métrica integrada possibilita comparar misturas não apenas pelo seu impacto absoluto, mas pela sua eficiência ambiental em relação ao desempenho entregue.

Capacitação e Transferência de Conhecimento

Além das análises técnicas, o projeto incluiu uma componente importante de capacitação da equipe da CCR. Foi desenvolvido um programa de treinamento para o uso do software SimaPro aplicado à pavimentação, incluindo:

- Conceitos fundamentais de ACV e das normas ISO 14040/14044.
- Estruturação de modelos de ACV para intervenções de pavimentação.
- Coleta e organização de dados de inventário.
- Interpretação de resultados e comunicação de conclusões.

Um manual de procedimentos foi elaborado para documentar as etapas da ACV e servir como referência para futuros estudos, garantindo a sustentabilidade da prática dentro da organização.

Referências Metodológicas e Ferramentas de Gestão

O projeto dialogou com práticas consagradas de gestão de ativos e análise econômica de infraestruturas rodoviárias, como o HDM-4 (Highway Development and Management), que é amplamente utilizado para a avaliação integrada de custos de usuários, manutenção e impactos ao longo do ciclo de vida de rodovias. Essa integração permite que os resultados da ACV sejam incorporados em análises econômicas mais amplas, apoiando decisões que considerem simultaneamente critérios técnicos, ambientais e econômicos.

Síntese da Abordagem Metodológica

Em síntese, a abordagem metodológica do projeto combina rigor científico, conformidade normativa e aplicabilidade prática. A utilização de ferramentas especializadas (SimaPro, MeDiNa), a integração de dados primários de alta qualidade, a conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040/14044 e a validação cruzada entre modelos e campo garantem que os resultados sejam robustos, transparentes e úteis para a tomada de decisão em projetos de pavimentação sustentável.

3. DETALHAMENTO DAS ETAPAS DO PROJETO

Nesta seção, são detalhadas cada uma das etapas e suas respectivas atividades, executadas durante o desenvolvimento do projeto. Apresenta-se a exposição das técnicas, métodos, procedimentos e parâmetros adotados, bem como os resultados, análises e conclusões de cada fase, destacando sua contribuição para o atingimento dos objetivos gerais e específicos.

● ETAPA A: Seleção e coleta de dados das pesquisas de pavimentos

Procedimentos e Métodos: Esta etapa inicial, com duração de dois meses, foi dedicada à compilação exaustiva de informações provenientes de ensaios de laboratório e relatórios de pesquisa (internos e de projetos de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico - RDT) desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da CCR Nova Dutra ao longo dos últimos 10 anos. A metodologia consistiu em um levantamento sistemático do acervo técnico, focando em dados de caracterização de materiais (agregados e ligantes) e dosagem de misturas asfálticas.

Resultados e Análise Crítica: O resultado principal foi a consolidação de uma base de dados bruta, contendo um volume significativo de informações sobre as propriedades físicas e mecânicas das misturas estudadas. A análise crítica revelou a riqueza do acervo técnico disponível, mas também a sua heterogeneidade e a falta de um formato padronizado, o que reforçou a necessidade da etapa subsequente de estruturação.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa foi fundamental e constituiu o primeiro passo para o atingimento do Objetivo Específico 01 (Compilação e Banco de Dados), ao reunir a matéria-prima essencial para a criação do banco de dados consolidado.

● ETAPA B: Coleta de informações sobre a aplicação em campo

Procedimentos e Métodos: Em paralelo à Etapa A, esta atividade de dois meses focou na coleta de informações relativas à aplicação efetiva das misturas em campo. Foram levantados dados de obras, incluindo localização precisa (rodovia, trecho, quilometragem), data da intervenção, dimensões (extensão, espessura), e dados do processo produtivo, como tipo de usina de asfalto,

localização, combustível utilizado, temperaturas de usinagem e compactação, e equipamentos empregados. Adicionalmente, foram coletados registros históricos de desempenho das restaurações.

Resultados e Análise Crítica: O resultado foi um conjunto de dados complementares aos de laboratório, vinculando cada mistura a uma aplicação real e ao seu contexto operacional. A análise crítica evidenciou a complexidade de correlacionar os dados de campo com os de laboratório devido a variáveis como condições climáticas no dia da aplicação e especificidades de cada obra, destacando a importância de uma abordagem estatística na análise posterior.

Contribuição para os Objetivos: A etapa foi crucial para o Objetivo Específico 01, fornecendo o contexto de aplicação real das misturas, e para os Objetivos 02 (Desempenho) e 05 (Verificação com MeDiNa), ao prover os dados de desempenho em campo necessários para as análises e comparações.

- **ETAPA C: Elaboração de banco de dados**

Procedimentos e Métodos: Com duração de três meses, esta etapa foi dedicada a estruturar, limpar e consolidar as informações brutas das Etapas A e B em um banco de dados mestre. Utilizando planilhas eletrônicas (Microsoft Excel), a equipe padronizou nomenclaturas, tratou dados ausentes ou inconsistentes e realizou um rigoroso controle de qualidade (QA/QC). O escopo espacial da análise foi definido para a Rodovia BR-116, nos trechos entre o km 211 e o km 232 (pistas centrais e marginais, em ambos os sentidos), ao longo de 10 anos de concessão.

Resultados e Análise Crítica: O principal produto desta etapa foi um banco de dados unificado e validado, documentado no anexo C do projeto. A análise estatística descritiva deste banco de dados permitiu uma primeira caracterização do universo de dados, identificando a frequência de uso dos diferentes tipos de ligantes, usinas e traços de misturas. A correlação preliminar entre as variáveis de consumo de energia (MJ) e emissões (CO₂-eq) já indicava uma forte associação, como esperado.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa realizou plenamente o Objetivo Específico 01, criando o alicerce de dados indispensável para todas as análises subsequentes do projeto, em especial as Etapas D, F e G.

- **ETAPA D: Análise de desempenho e desenvolvimento de dashboards**

Procedimentos e Métodos: Durante dois meses, a análise de desempenho foi realizada por meio da ferramenta desenvolvida no projeto (calculadora), que integra o banco de dados estruturado, os modelos de cálculo e os mecanismos de consolidação de resultados em um único ambiente. A ferramenta permite a análise comparativa do desempenho técnico das misturas, incluindo a

visualização de séries históricas de indicadores como IRI (Índice de Irregularidade Internacional), trincamento e deformação permanente, com segmentação por tipo de mistura, trecho da rodovia e período. Dessa forma, a solução implementada incorpora funcionalidades típicas de ferramentas de Business Intelligence, dispensando o uso de plataformas externas como o Power BI.

Resultados e Análise Crítica: O resultado foi a consolidação de um ambiente integrado de análise, capaz de transformar dados tabulares em indicadores técnicos e ambientais diretamente utilizáveis. A análise permitiu identificar, de forma ágil, as famílias de misturas com melhor e pior desempenho relativo, bem como outliers que demandam investigação específica.

A estrutura adotada mostrou-se eficaz para a interpretação técnica dos dados e para a comunicação de resultados a públicos técnicos e gerenciais, mantendo rastreabilidade entre dados de entrada, parâmetros e resultados.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa atendeu integralmente ao Objetivo Específico 02 (Análise de Desempenho), ao viabilizar a análise comparativa das misturas a partir de uma base estruturada e integrada. Adicionalmente, forneceu subsídios relevantes para a interpretação dos resultados da ACV (Etapa F), ao permitir a contextualização dos impactos ambientais em função do desempenho técnico das soluções.

● **ETAPA E: Aquisição e treinamento em SimaPro e ACV**

Procedimentos e Métodos: Esta etapa, com duração de dois meses, focou na capacitação técnica e na aquisição das ferramentas necessárias para a Análise de Ciclo de Vida. Foram adquiridas licenças do software SimaPro®, referência global em ACV, e da base de dados Ecoinvent (v3.11). A equipe de pesquisadores da UFRJ e técnicos da CCR participou de um programa de treinamento detalhado, cobrindo desde os fundamentos das normas ISO 14040/14044 até a modelagem avançada de sistemas de produto no SimaPro.

Resultados e Análise Crítica: Ao final da etapa, o projeto contava com um ambiente de software plenamente operacional e uma equipe capacitada para conduzir estudos de ACV de forma autônoma e em conformidade com as melhores práticas internacionais. A análise crítica destacou a importância de investir na capacitação para garantir a qualidade e a credibilidade das análises ambientais, evitando o uso inadequado da ferramenta.

Contribuição para os Objetivos: A etapa realizou o Objetivo Específico 06 (Capacitação SimaPro/ACV), sendo um pré-requisito indispensável para a execução da Etapa F.

● **ETAPA F: Aplicação da técnica de ACV**

Procedimentos e Métodos: Sendo a etapa mais longa do projeto (seis meses), a aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) constituiu o núcleo da avaliação ambiental, sendo conduzida conforme as diretrizes da ABNT NBR ISO 14044.

A metodologia foi estruturada nas seguintes fases: Definição de Objetivo e Escopo: Definiu-se como unidade funcional do estudo o desempenho estrutural da solução de pavimentação, expresso em função do número de repetições equivalentes do eixo padrão (N), permitindo a comparação entre alternativas com diferentes vidas úteis e níveis de solicitação.

As fronteiras do sistema foram estabelecidas do tipo berço à aplicação/construção, incluindo: extração e produção de materiais, transporte de insumos, usinagem, transporte da mistura e operações de aplicação e compactação em campo.

Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV): Os dados primários obtidos na Etapa C (consumos, distâncias de transporte, parâmetros de processo e condições operacionais) foram integrados ao ambiente de modelagem do SimaPro®, sendo acoplados aos dados secundários da base ecoinvent (v3.11, sistema cut-off, U), de forma a quantificar os fluxos de entrada e saída ao longo do sistema.

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV): Os impactos ambientais foram avaliados utilizando o método ReCiPe 2016 para a categoria de Mudanças Climáticas (kg CO₂-eq, GWP100).

Adicionalmente, o consumo energético foi quantificado por meio do indicador de Demanda Cumulativa de Energia (CED), expresso em MJ, obtido a partir dos fluxos energéticos do inventário.

Interpretação: Os resultados foram analisados com o objetivo de identificar os principais contribuintes de impacto (hotspots), sendo conduzidas análises de sensibilidade para avaliar a influência de parâmetros críticos, como distâncias de transporte, teor de ligante e desempenho estrutural (N), na robustez dos resultados.

Resultados e Análise Crítica: Os resultados, detalhados no anexo F, permitiram quantificar o perfil de impacto ambiental das diferentes soluções de mistura asfáltica, integrando desempenho estrutural e impactos ambientais em uma mesma base comparativa.

A análise evidenciou que:

- a produção do ligante asfáltico constitui o principal contribuinte para as emissões de CO₂-eq;
- as distâncias de transporte (insumos e mistura) representam parcela relevante do consumo energético e das emissões;
- a normalização por desempenho (N) altera significativamente a comparação entre alternativas, favorecendo soluções com maior vida útil estrutural, mesmo quando apresentam maior intensidade de impacto por tonelada.

Essa abordagem permite superar análises baseadas exclusivamente em massa ou custo, incorporando o desempenho ao longo do ciclo de vida como variável central na avaliação ambiental.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa atendeu diretamente aos Objetivos Específicos O3 (modelagem ACV das intervenções) e O4 (quantificação de impactos ambientais), fornecendo os indicadores necessários para a análise comparativa entre soluções e para a integração entre desempenho estrutural e sustentabilidade ambiental.

- **ETAPA G: Verificação com o software MeDiNa**

Procedimentos e Métodos: Durante dois meses, foram realizados estudos de caso utilizando o software MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). As estruturas de pavimento das intervenções realizadas em campo foram simuladas no software, utilizando os mesmos materiais e parâmetros de tráfego. O objetivo era confrontar as previsões de desempenho do modelo (ex: vida de fadiga, deformação permanente) com o comportamento real medido na rodovia.

Resultados e Análise Crítica: Os resultados, apresentados no anexo E, não mostraram uma boa aderência entre as previsões do MeDiNa e o desempenho observado em campo para a maioria dos casos, embora. A análise crítica concluiu que o MeDiNa é uma ferramenta robusta e adequada para a verificação mecanístico-empírica, mas que a calibração de seus modelos com dados locais é fundamental para aumentar a precisão das previsões.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa atingiu plenamente o Objetivo Específico 05 (Verificação com MeDiNa), fortalecendo a coerência entre simulação de projeto e desempenho real e aumentando a confiabilidade na seleção de futuras soluções de pavimentação.

- **ETAPA H: Elaboração de manual para uso do SimaPro**

Procedimentos e Métodos: Com base na experiência adquirida na Etapa F e no treinamento da Etapa E, a equipe dedicou dois meses para elaborar um manual de procedimento detalhado para a aplicação da ACV em projetos de pavimentação utilizando o SimaPro. O manual foi estruturado como um guia passo a passo, incluindo templates de projeto, listas de verificação (QA/QC) e exemplos práticos.

Resultados e Análise Crítica: O resultado foi um manual didático e completo, que serve como um ativo de conhecimento para a CCR. A análise crítica ressaltou que tal documento é essencial para garantir a padronização e a continuidade da aplicação da ACV na empresa, permitindo que novos projetos sejam avaliados de forma consistente no futuro.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa contribuiu diretamente para o Objetivo Específico 06 (Capacitação), ao formalizar e documentar o conhecimento adquirido, garantindo sua perpetuação na organização.

- **ETAPA I: Consolidação e elaboração dos relatórios finais**

Procedimentos e Métodos: A etapa final do projeto, com duração de três meses, foi dedicada à consolidação de todos os resultados obtidos, à integração das análises técnica e ambiental e à elaboração dos documentos finais. Isso incluiu a redação dos sete anexos, a preparação de apresentações gerenciais e a revisão final de todo o material produzido.

Resultados e Análise Crítica: O resultado é o conjunto completo de entregas do projeto, incluindo o presente Relatório Final e os anexos que o suportam. A análise crítica desta fase focou em garantir que a narrativa do projeto fosse coesa e que as conclusões e recomendações fossem claramente comunicadas e suportadas pelas evidências geradas ao longo dos 27 meses de trabalho.

Contribuição para os Objetivos: Esta etapa é a síntese de todo o projeto, consolidando o atingimento de todos os objetivos, em especial o Objetivo Geral de integrar desempenho técnico e impactos ambientais para apoiar a tomada de decisão.

4. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

Esta seção final consolida os resultados e as conclusões do projeto, avaliando o alcance dos objetivos, a eficácia dos métodos empregados e a utilidade prática dos produtos gerados. Apresenta-se uma análise crítica das vantagens e limitações do estudo, bem como uma demonstração da viabilidade e dos impactos das tecnologias avaliadas, concluindo com o plano de transferência de conhecimento.

- **Alcance dos Objetivos**

O projeto atingiu com sucesso seu Objetivo Geral, que consistia em avaliar o ciclo de vida de materiais e misturas asfálticas, integrando desempenho técnico e impactos ambientais para apoiar a tomada de decisão. Todos os seis Objetivos Específicos foram plenamente alcançados, conforme evidenciado pelos produtos e resultados gerados em cada etapa:

- (01) Compilação e Banco de Dados: O objetivo foi cumprido com a entrega do Anexo C, que detalha a criação de um banco de dados mestre, unificado e validado, contendo dez anos de informações de laboratório e campo.

- (02) Análise de Desempenho: O objetivo foi alcançado por meio do desenvolvimento de uma ferramenta integrada de análise (calculadora), que incorpora o banco de dados estruturado e os mecanismos de processamento e consolidação dos indicadores. Essa solução permite a análise comparativa do desempenho das misturas de forma sistemática, incluindo a avaliação de séries históricas e a segmentação por tipo de material, trecho e período, conforme detalhado na Etapa D. A ferramenta desenvolvida incorpora funcionalidades equivalentes às de dashboards interativos, atendendo aos requisitos de visualização e análise originalmente previstos, sem a necessidade de plataformas externas.
- (03) ACV das Intervenções: O objetivo foi atingido com a modelagem do ciclo de vida das intervenções no software SimaPro, cujos resultados e metodologia estão documentados no Anexo G e F.
- (04) Quantificação de Impactos Ambientais: O objetivo foi plenamente realizado, com a quantificação das emissões de CO₂-eq e do consumo de energia para cada alternativa, permitindo uma comparação objetiva da pegada ambiental.
- (05) Verificação com MeDiNa: O objetivo foi cumprido através da verificação mecanístico-empírica documentada no Anexo E, que confrontou as previsões do software com o desempenho real observado em campo.
- (06) Capacitação Técnica: O objetivo foi alcançado com o treinamento da equipe da CCR no software SimaPro e com a elaboração de um manual de procedimento detalhado (Anexo G), garantindo a autonomia da concessionária em futuras análises.

● **Avaliação dos Métodos e Técnicas Adotadas**

A abordagem metodológica integrada, que combinou a Análise de Ciclo de Vida (ACV) com a verificação de desempenho mecanístico-empírica (MeDiNa), mostrou-se extremamente adequada e eficaz para o atingimento dos objetivos. A conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040/14044 conferiu robustez e credibilidade à avaliação ambiental, enquanto o uso de ferramentas como SimaPro e a calculadora de emissões permitiu análises complexas e uma comunicação de resultados clara e acessível.

Como ponto de melhoria, futuros estudos poderiam expandir as fronteiras do sistema da ACV para incluir com maior detalhe as fases de uso do pavimento (efeito do IRI na emissão dos veículos) e de fim de vida (reciclagem e disposição), que foram abordadas de forma mais simplificada no presente estudo. Adicionalmente, a utilização de dados de emissão ainda mais regionalizados, em vez dos dados genéricos da base Ecoinvent, poderia aumentar a precisão dos resultados de impacto ambiental.

● **Avaliação da Utilidade Prática dos Resultados e Produtos**

Os resultados e produtos deste projeto possuem elevada utilidade prática para a concessionária, para a infraestrutura rodoviária e para a sociedade.

- Para a Concessionária: O banco de dados e os dashboards permitem uma gestão de ativos mais estratégica e baseada em evidências. A capacidade de comparar alternativas de pavimentação considerando simultaneamente desempenho, custo de ciclo de vida e impacto ambiental permite otimizar a alocação de recursos, reduzir riscos e selecionar tecnologias que ofereçam maior durabilidade e sustentabilidade a longo prazo.
- Para a Infraestrutura Rodoviária: O projeto contribui para o avanço da engenharia de pavimentos no Brasil, ao introduzir de forma sistemática a variável ambiental no processo de tomada de decisão. Isso fomenta o desenvolvimento e a aplicação de materiais e tecnologias de menor impacto, como misturas com ligantes modificados de alto desempenho ou com adição de material reciclado (RAP), que podem aumentar a vida útil dos pavimentos e reduzir a necessidade de intervenções frequentes.
- Para o Conforto e a Segurança do Usuário: Ao permitir a seleção de soluções de pavimentação mais duráveis, o projeto contribui indiretamente para a melhoria do conforto e da segurança dos usuários. Pavimentos com melhor desempenho mantêm um bom nível de regularidade (baixo IRI) por mais tempo e demandam menos obras de manutenção, reduzindo o número de interdições na rodovia e os transtornos associados a elas.

● Vantagens, Desvantagens e Melhorias

Vantagens e Resultados Práticos	Deficiências, Desvantagens e Melhorias
Criação de um ativo de conhecimento: O banco de dados unificado é um legado duradouro para a concessionária.	Escopo limitado: A análise está restrita a um segmento específico da BR-116 e aos últimos 10 anos.
Tomada de decisão multicritério: Permite balancear os fatores técnico, ambiental e, indiretamente, econômico.	Dados de inventário: A ACV dependeu de dados secundários da base Ecoinvent, que podem não refletir perfeitamente a realidade brasileira.
Identificação de "hotspots": A ACV identificou claramente que a produção do ligante e o transporte são os principais contribuintes para os impactos, direcionando os esforços de mitigação.	Análise econômica: O projeto não incluiu uma Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) formal, focando na viabilidade técnica e ambiental.
Capacitação interna: A equipe da CCR foi treinada para dar continuidade às análises de forma autônoma.	O que poderia ser melhorado: Aprofundar a análise de incerteza (via simulação de Monte Carlo no SimaPro) e expandir o estudo para outros segmentos da concessão.

● Viabilidade Econômica e Custo-Benefício

Embora uma Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) formal não tenha sido o foco do projeto, a viabilidade econômica das tecnologias pode ser inferida a partir da análise integrada de desempenho e ACV. Tecnologias que, apesar de um custo inicial potencialmente maior (ex: misturas com ligantes modificados por polímeros ou borracha), apresentam uma vida de fadiga

significativamente superior, tendem a ter um melhor custo-benefício a longo prazo. Isso ocorre porque a maior durabilidade reduz a frequência de intervenções de manutenção e reabilitação, diluindo o investimento inicial ao longo de um período maior e diminuindo os custos operacionais e os custos sociais associados às obras.

O projeto demonstrou que a análise de custo inicial isoladamente é insuficiente. Ao normalizar os impactos ambientais pela vida de fadiga (N), a metodologia do projeto oferece um proxy para o custo-benefício ambiental, mostrando que misturas mais duráveis, mesmo que consumam um pouco mais de energia na produção, podem ser mais eficientes ao longo de todo o ciclo de vida.

- **Avaliação dos Produtos Desenvolvidos**

Banco de Dados Estruturado (Calculadora de Emissões): O banco de dados estruturado, implementado na forma da calculadora de emissões, constitui o núcleo operacional do projeto, integrando dados de dosagem, produção, transporte, aplicação e desempenho em uma única base parametrizada.

Sua principal potencialidade reside na capacidade de converter dados operacionais diretamente em indicadores ambientais e técnicos (MJ/t, kg CO₂e/t e, posteriormente, MJ/N e kg CO₂e/N), permitindo análises comparativas entre soluções de forma rastreável e reprodutível.

Diferentemente de ferramentas puramente visuais, essa estrutura substitui funcionalmente os dashboards ao concentrar, em um único ambiente, tanto o armazenamento quanto o processamento dos dados, viabilizando consultas, consolidações e geração de resultados diretamente a partir da base.

Como limitação, destaca-se a dependência da qualidade, padronização e atualização contínua dos dados de entrada, exigindo governança de dados e controle rigoroso de consistência.

Calculadora de Emissões: A calculadora opera como o mecanismo de cálculo embutido no banco de dados, responsável por aplicar os fatores de emissão e energia aos dados de entrada e estruturar os resultados segundo a lógica da unidade funcional do estudo.

Sua principal potencialidade é permitir análises rápidas, consistentes e alinhadas à metodologia de ACV adotada, funcionando como ferramenta de apoio à decisão e de triagem técnica para avaliação de alternativas.

Como limitação, a ferramenta utiliza parâmetros médios e simplificações inerentes ao modelo adotado, não substituindo integralmente uma modelagem ACV completa em ambiente dedicado (SimaPro®), especialmente em análises de maior granularidade.

Manual de Procedimentos: O manual assegura a padronização dos processos de coleta, tratamento e análise de dados, garantindo consistência metodológica na aplicação da ACV e na utilização da calculadora.

Sua principal potencialidade é institucionalizar o método desenvolvido, permitindo sua replicação, atualização e expansão ao longo do tempo.

Sua efetividade depende de comprometimento organizacional com a aplicação contínua dos procedimentos, capacitação das equipes e manutenção dos parâmetros e bases de dados utilizados.

- **Impactos Ambientais Comparados**

O projeto confirmou que a fase de produção de materiais, especialmente a do ligante asfáltico, e a fase de transporte são as que mais contribuem para os impactos ambientais (emissões de GEE e consumo de energia). A análise comparativa entre as alternativas mostrou que:

- Misturas com ligantes modificados (polímero, borracha): Geralmente apresentam um impacto de produção ligeiramente superior ao de misturas convencionais, devido à energia adicional no processo de modificação. No entanto, seu desempenho superior (maior vida de fadiga) frequentemente resulta em um menor impacto por unidade de serviço prestado ao longo do ciclo de vida.
- Uso de Agregados Reciclados (RAP): Embora não tenha sido o foco principal, a metodologia estabelecida permite avaliar futuramente o potencial de redução de impacto com o uso de RAP, que tende a diminuir significativamente a pegada de carbono e o consumo de energia ao substituir a produção de ligante e agregados virgens.

Parâmetro		Situação Usual (Mistura Convencional)	Situação Alcançada pela Pesquisa (Mistura de Alto Desempenho)
Critério Decisão	de	Custo inicial e desempenho mínimo	Custo de ciclo de vida, desempenho superior e impacto ambiental
Vida Útil		Padrão	Estendida (ex: 2x ou mais, dependendo da tecnologia)
Impacto Ambiental		Base de referência	Ligeiramente maior na produção, mas potencialmente menor ao longo do ciclo de vida devido à maior durabilidade
Frequência Intervenção	de	Maior	Menor

- **Produtos Gerados pelo Projeto**

- Banco de Dados Estruturado e Calculadora de Emissões: Base consolidada contendo 10 anos de dados de laboratório, obras e desempenho em campo, estruturada com lógica de cálculo integrada para geração de indicadores técnicos e ambientais (MJ/t, kg CO₂e/t, MJ/N e kg CO₂e/N). Este produto substitui funcionalmente os dashboards ao concentrar, em um único ambiente, o armazenamento, processamento e análise dos dados.
- Relatórios de Análise de Ciclo de Vida (ACV): Documentação detalhada dos impactos ambientais das intervenções, incluindo modelagem no SimaPro® com base ecoinvent, resultados por unidade funcional.
- Relatórios de Verificação Mecânico-Empírica: Análises comparativas entre desempenho observado em campo e simulações realizadas no MeDiNa, com avaliação de coerência e métricas de erro.
- Manual de Procedimentos para ACV: Guia técnico para aplicação padronizada da metodologia de ACV, incluindo coleta de dados, modelagem no SimaPro® e interpretação de resultados.
- Conjunto de Relatórios Técnicos: Conjunto estruturado dos sete Anexos que compõem a entrega final do projeto, abrangendo desde a base metodológica até os resultados consolidados.

- **Transferência de Tecnologia e Conhecimento**

A transferência de tecnologia e conhecimento gerados pelo projeto para a ANTT e para a sociedade será realizada por múltiplos canais:

- Manuais e Relatórios: O conjunto completo dos materiais desenvolvidos, incluindo o manual de procedimentos, será entregue à ANTT, servindo como uma base de conhecimento detalhada e replicável.
- Proposta de Normativo: Os resultados podem subsidiar a discussão de futuras atualizações de normativos, incentivando a inclusão de critérios de ciclo de vida e sustentabilidade na avaliação de projetos de pavimentação.
- Materiais Didáticos e Publicações: O conhecimento gerado tem potencial para ser transformado em artigos científicos e materiais didáticos para cursos de graduação e pós-graduação em engenharia, disseminando a metodologia no meio acadêmico.
- Capacitação Contínua: A equipe da CCR, agora capacitada, atuará como um núcleo multiplicador do conhecimento dentro da própria organização e do setor de concessões.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional**. Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR). Brasília, DF.

ECOINVENT. **Ecoinvent Database v3.x**. The Ecoinvent Association, Zurich, Switzerland. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/>.

PRÉ-SUSTAINABILITY. **SimaPro Software**. Amersfoort, The Netherlands. Disponível em: <https://simapro.com/>.

6. ANEXOS

Nesta seção, são apensados os anexos que consolidam os resultados e produtos detalhados do projeto.

- **ANEXO A** – Resumo Executivo e Apresentação do Projeto
- **ANEXO B** – Revisão da Literatura
- **ANEXO C** – Compilação de Informações e Banco de Dados
- **ANEXO D** – Manual da Calculadora de Emissões de GEE
- **ANEXO E** – Análise com MeDiNa
- **ANEXO F** – Relatório da ACV por Intervenção
- **ANEXO G** – Manual de Treinamento SimaPro para Pavimentação