

Avaliação do ciclo de vida (ACV) de misturas asfálticas do tipo Matriz Pétreia Asfáltica (SMA) com adição de fibras de coco

Life cycle assessment (LCA) of stone matrix asphalt (SMA) with addition of coconut fibers

Arthur Ferreira Rocha & Mario Rene Rivera Osorto & Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade of Brasília, Brasil, arochaunb@gmail.com

RESUMO: A pesquisa avalia o impacto ambiental da incorporação da fibra de coco no SMA (Stone Matrix Asphalt – Matriz Pétreia Asfáltica) para pavimentação aeroportuária através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O SMA oferece durabilidade, mas tem custos de investimento mais altos em comparação com outras misturas asfálticas. O estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da fibra de coco como alternativa sustentável às fibras de celulose devido à sua abundância nas regiões costeiras do Brasil. Por meio da ACV, são comparados os impactos ambientais de diferentes misturas asfálticas, fundamentais para a exploração de alternativas sustentáveis de materiais. Os resultados indicam que, apesar dos impactos ambientais equivalentes, a obtenção da fibra de coco incorre em custos significativamente menores em comparação com as fibras de celulose, tornando-se uma escolha custo-efetiva ao longo do tempo. As fibras de coco atendem aos parâmetros volumétricos e mecânicos do pavimento. A pesquisa propõe analisar a pista do aeroporto de Aracaju, incorporando o SMA com fibras de coco, para avaliar os efeitos ambientais e os custos associados a essa mistura modificada. No geral, o estudo ressalta a importância de materiais sustentáveis na produção de asfalto para o desenvolvimento de infraestrutura ecológica

ABSTRACT: The research evaluates the environmental impact of incorporating coconut fiber into Stone Matrix Asphalt (SMA) for airport pavement via Life Cycle Assessment (LCA). SMA offers durability but has higher investment costs compared to other asphalt mixtures. The study aims to assess the feasibility of coconut fiber as a sustainable alternative to cellulose fibers due to its abundance in Brazil's coastal regions. Through LCA, environmental impacts of different asphalt mixtures are compared, crucial for exploring sustainable material alternatives. Results indicate that despite equivalent environmental impacts, obtaining coconut fiber incurs significantly lower costs compared to cellulose fibers, making it a cost-effective choice over time. Coconut fibers meet volumetric and mechanical pavement parameters. The research proposes analyzing Aracaju airport's runway, incorporating SMA with coconut fibers, to evaluate environmental effects and costs associated with this modified mixture. Overall, the study underscores the importance of sustainable materials in asphalt production for eco-friendly infrastructure development.

KEYWORDS: SMA, LCA, Asphalt mixtures, Coconut-Fiber, Environmental Impact.

1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado do coco verde no Brasil representa um risco ambiental significativo devido à sua difícil degradação e às emissões de metano. Este estudo visa complementar pesquisas em novos materiais para pavimentação, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar o impacto ambiental.

O objetivo é desenvolver misturas asfálticas sustentáveis para estruturas rodoviárias e aeroportuárias no Brasil, utilizando fibra de coco como alternativa. A pesquisa propõe analisar a pista do aeroporto de Aracaju, em Sergipe, que incorporou o asfalto SMA, visando melhorias significativas no comportamento do pavimento. Será investigada a adição de fibras de coco à mistura SMA para avaliar os efeitos ambientais e custos associados. Isso é importante devido à crescente demanda por produtos ecologicamente corretos na comunidade de pavimentação.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. Desenvolvimento sustentável

Com o rápido crescimento da população urbana em todo o mundo, torna-se cada vez mais crucial adotar práticas sustentáveis, como desenvolver tecnologias e promover padrões de consumo

mais responsáveis. Isso inclui reduzir desperdícios de alimentos, minimizar a geração de resíduos por meio de prevenção, reciclagem e reutilização. Esses esforços estão alinhados com o desenvolvimento sustentável e são apoiados pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, que estabelece critérios rigorosos para mitigar impactos ambientais. Essa abordagem requer colaboração entre países, empresas, instituições e a sociedade civil.

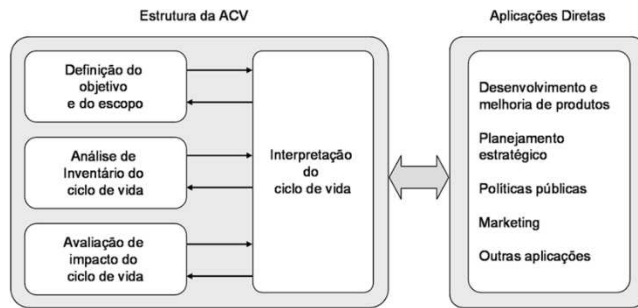
Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) têm como objetivo garantir direitos humanos, erradicar a pobreza, combater a desigualdade, promover a igualdade de gênero, enfrentar as mudanças climáticas e resolver outros desafios globais. O setor privado desempenha um papel crucial nesse processo, pois detém grande poder econômico, impulsiona inovações e tecnologias, e influencia diversos públicos, incluindo governos, fornecedores, funcionários e consumidores (IPEA, 2016).

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida

A ACV tem sido amplamente utilizada nas últimas duas décadas para avaliar os impactos ambientais dos materiais de pavimentação (HAKKINEN et al., 1996). Desde então, a pesquisa e o desenvolvimento em ACV de pavimentos aceleraram (SANTOS et al., 2015). Desse modo, várias pesquisas utilizaram

uma estrutura de ACV de pavimento para avaliar o desempenho ambiental e tomada de decisão a níveis de projeto e de rede (HARVEY et al., 2016).

Figura 1 - Estrutura do ACV e suas principais aplicações.



2.2.1. Panorama Histórico da ACV

Na década de 60, com a crise do petróleo, teve início o interesse pelos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. Esse período foi marcado por uma reflexão da sociedade sobre os limites da extração dos recursos naturais, especialmente os combustíveis fósseis e minerais. Um marco significativo foi o estudo pioneiro realizado para a Coca-Cola, abordando uma ampla gama de análises de impacto ambiental (GUINEÉ et al., 2011). O objetivo era selecionar o tipo de embalagem que demandasse menos recursos e causasse menos impacto ambiental (BARBIERI et al., 2009).

2.2.2. Fases da Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida ocorre em quatro etapas: definição de objetivos e escopo, Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e coleta de dados, avaliação de impacto e interpretação de resultados. A ACV visa mapear a localização e os ciclos de vida dos processos de produção em termos de sustentabilidade no uso dos recursos naturais

2.2.3. Definição do Objetivo e Escopo

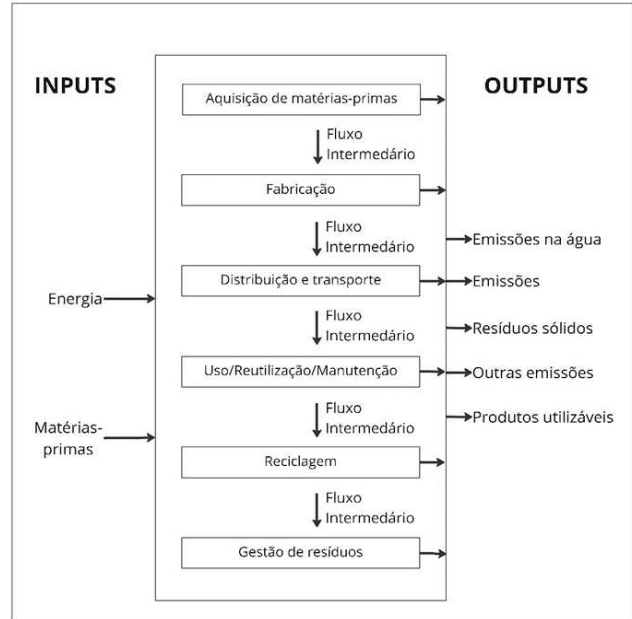
O escopo de um estudo de ciclo de vida relaciona as fronteiras do sistema analisado com os fluxos sob análise e o nível de detalhamento do estudo, além de definir a unidade funcional de referência (IPEA, 2016). Essa fase deve abranger todas as informações necessárias para atingir um objetivo específico. Ao descrever minuciosamente todo o sistema, é possível determinar quais dados devem ser coletados ou pesquisados na literatura para fornecer ao modelo as informações relevantes.

2.2.4. Análise de Inventário

A análise do Inventário do Ciclo de Vida é fundamental para quantificar as entradas e saídas do sistema do produto, abrangendo o uso de recursos e as emissões relacionadas. As entradas incluem energia, matéria-prima e água, enquanto as saídas englobam produtos, subprodutos, resíduos e emissões. Bases de dados como o Ecoinvent fornecem inventários do ciclo de vida de vários processos em diferentes países, apoiando estudos de ACV. Na

figura 2 é apresentada a esquematização das entradas e saídas do fluxo em um estudo ACV.

Figura 2. Análise de Inventário (Fluxos de entrada e saída).



2.2.4. Avaliação de Impacto

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida relaciona os dados do inventário do ciclo de vida a categorias de impacto ambiental para avaliar seu potencial. Isso envolve seleção, classificação e caracterização das categorias de impacto, utilizando modelos que atribuem fatores a cada substância para mostrar sua importância nos impactos ambientais. Os resultados são expressos em termos de uma substância de referência, como CO₂-eq, para mudanças climáticas, e dependem dos melhores modelos e dados disponíveis para cada categoria de impacto.

2.3.4. Interpretação

Durante a interpretação dos resultados do estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), são realizadas análises de integridade, sensibilidade e incerteza para compreender melhor os impactos ambientais das atividades avaliadas. A análise de integridade verifica se todos os dados necessários foram coletados para o estudo, garantindo que o escopo seja abrangente o suficiente para capturar todos os aspectos relevantes. Por outro lado, a análise de sensibilidade tem como foco avaliar a robustez dos resultados e conclusões, examinando o impacto das incertezas nos dados, nos métodos de alocação e nas suposições feitas ao longo do processo de avaliação. Essas análises são essenciais para fornecer uma visão mais completa e confiável dos impactos ambientais das atividades analisadas (SILVA, 2012).

2.4. Coco Verde: Aspectos Econômicos, Sociais e Ambientais

Introduzido no Brasil em 1553, o coqueiro, originalmente da ilha de Cabo Verde, encontrou solo fértil na Bahia, onde surgiu a

expressão "coco-da-baía". Sua cultura se expandiu pelo litoral nordestino, adaptando-se bem ao clima tropical. Atualmente, o país é um dos principais produtores mundiais de coco, com aproximadamente 3 milhões de toneladas anuais cultivadas em 290 mil hectares.

O cultivo é dividido entre coco seco para a indústria agrícola e coco verde para comercialização da água de coco. Tecnologias de manejo e variedades melhoradas contribuem para um rendimento médio de 13.114 kg/ha, especialmente na região Nordeste, que concentra a maior parte da produção. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, o cultivo é predominante, com a variedade anã para água de coco. Enquanto o Sudeste se destaca pelo alto rendimento médio, o Centro-Oeste se sobressai pela produtividade física elevada. Apesar de liderar em produção, o Nordeste enfrenta desafios de produtividade e valor de venda, indicando espaço para melhorias no setor.

2.4.1. Potencial de Aproveitamento da casca de coco

O processamento da casca de coco resulta em dois principais produtos: as fibras longas, correspondentes a 30% da casca, e as fibras curtas ou pó de casca de coco, representando os 70% restantes. Esses produtos têm uma ampla gama de aplicações, incluindo a fabricação de mantas e substratos agrícolas, utensílios domésticos, artesanato, materiais para construção civil, entre outros (FONTENELE, 2005).

Figura 3 – Fibras de Coco



As características técnicas da fibra da casca de coco que a tornam adequada para uso industrial incluem sua inodora, resistência à umidade, não atratividade para roedores, decomposição lenta, resistência a fungos e propriedades como isolante térmico (SENHORAS, 2003). Corradine et al. (2009) destacam a excelente qualidade das fibras da casca de coco devido à flexibilidade e alto teor de lignina, o que as torna adequadas para aplicações como reforço em compósitos. Essas fibras apresentam aproximadamente 35% de lignina em sua composição química (VAN DAM et al., 2006).

3. PAVIMENTAÇÃO

3.1. Pavimentos Aeroportuários

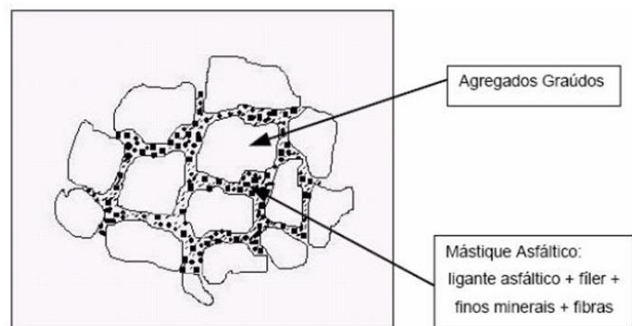
Os pavimentos aeroportuários são áreas essenciais nos aeródromos destinadas às operações de pouso, decolagem e movimentação de aeronaves, conforme definido pelo Código Brasileiro de Aeronáutica. Ao contrário dos pavimentos rodoviários, os pavimentos aeroportuários enfrentam desafios únicos devido às cargas extremas impostas pelas aeronaves durante o pouso. Essas estruturas exigem características geométricas e físicas específicas, além de um controle rigoroso na execução e manutenção para garantir sua funcionalidade e segurança. Parâmetros como aderência, suavidade ao rolamento e resistência são essenciais e são monitorados de perto para garantir o bom desempenho dos pavimentos aeroportuários.

3.2. Mistura asfáltica do tipo SMA

O SMA é uma mistura asfáltica usinada a quente, projetada para maximizar o contato entre os agregados graúdos, promovendo uma interação eficaz entre eles. Devido a essa graduação específica, são criados vazios consideráveis entre os agregados graúdos. Esses vazios são preenchidos por uma mistura de mástique asfáltico composta pela fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras. As fibras, geralmente orgânicas (de celulose) ou minerais, são adicionadas durante a usinagem, principalmente para evitar a segregação da mistura durante o transporte, facilitar a aplicação e prevenir o escorrimento do ligante asfáltico. Quanto ao agregado graúdo, é exigido que todo o material granular britado contenha pelo menos duas faces britadas em pelo menos 90% deste material (NAPA, 1999).

Segundo Vasconcelos (2004), as misturas SMA são conhecidas por sua graduação descontínua, caracterizada por uma alta proporção de agregados graúdos (70 a 80% em peso da mistura), uma porcentagem de volume vazios em torno de 4%, e teor de ligantes variando de 6 a 7%. Para evitar o escorrimento do ligante asfáltico durante as operações de mistura e compactação em altas temperaturas, devido principalmente às características granulométricas das misturas, são adicionadas fibras às misturas, geralmente fibras de celulose.

Figura 4. Composição Esquemática do SMA



Devido à sua graduação e alta concentração de agregados graúdos, o SMA apresenta uma macrotextura superficial bastante rugosa, formando pequenos "canais" entre os agregados graúdos, responsáveis pela melhoria da drenagem superficial do pavimento. O ligante asfáltico modificado, com adição de polímeros, é empregado para garantir melhores condições de desempenho da mistura asfáltica.

Ao longo dos anos de sua utilização, o SMA vem demonstrando vantagens que estimulam pesquisas em vários países. Essas pesquisas mostraram que o SMA é uma mistura asfáltica bastante resistente ao trincamento por fadiga ou por reflexão de trincas e ao afundamento em trilhas de roda, características importantes para os pavimentos aeroportuários (RAMOS, 2015).

3.2.1. Produção do SMA

A produção da mistura asfáltica do tipo SMA requer uma usina adequada e bem calibrada para garantir as características desejadas. Os agregados devem ser homogeneizados antes de serem colocados nos silos frios, e a ordem de mistura deve seguir os seguintes passos: agregados e fíler, fibra de celulose e cimento asfáltico.

Para a fabricação do SMA, são recomendadas usinas do tipo gravimétrica ou tambor-secador-misturador, equipadas com unidades classificadoras de agregados, misturadores capazes de produzir uma mistura homogênea e termômetros para monitorar as temperaturas. É importante garantir a homogeneidade das granulometrias dos diferentes agregados e a distribuição adequada das fibras de celulose.

As fibras de celulose podem ser adicionadas no tambor misturador sobre os agregados já aquecidos ou no misturador antes da adição do ligante, dependendo do tipo de usina. É fundamental que as fibras estejam bem distribuídas no agregado antes da adição do ligante. Se as fibras contiverem betume, esse conteúdo deve ser considerado na determinação do teor ótimo de ligante na mistura SMA. Na figura 5 é apresentado o modelo de usina tipo tambor-secador-misturador.

Figura 5. Usina tipo tambor-secador-misturador

Legenda

1. Dosador de agregados com duas células de carga individuais
2. Tambor secador com queimador Ammann
3. Tubulação de exaustão
4. Misturador Amix, Ammann
5. Filtro de mangas AFA, Ammann
6. Exaustor com chaminé
7. Elevador de arraste e silo de descarga
8. Sistema de controle Ammann as1Push



Segundo especificações finlandesas (PANK, 1995) é recomendada a adição diferentes tipos fibras em misturas asfálticas SMA, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Recomendações finlandesas para adição de fibras em misturas asfálticas tipo SMA em relação ao peso total da mistura ligante – agregado.

Tipo	Percentual de fibra na mistura (%)
Fibra de celulose	0,3 - 0,5
Fibra Mineral	0,7 - 0,9
Fibra de Vidro	0,4 - 0,6

Com o objetivo de evitar a formação de grumos ou uma homogeneização inadequada, recomenda-se o uso de fibras de celulose em forma granular (pellets). Pellets consistem em 50% de fibras de celulose com 50% de ligante asfáltico.

3.3. Fibras de Celulose

As fibras de celulose são essenciais para evitar o escoamento do ligante betuminoso durante o processamento, transporte e aplicação da mistura asfáltica SMA. Elas formam uma microarmadura tridimensional com os polímeros do ligante, aumentando a coesão do sistema e permitindo formulações flexíveis com alta porcentagem de ligante, sem riscos de exsudação ou perda de estabilidade mecânica.

Além de melhorar a coesão, as fibras permitem o uso de uma granulometria descontínua, aumentando a macrotextura do revestimento e melhorando a drenagem superficial e a aderência dos pneus ao pavimento, reduzindo os efeitos de aquaplanagem.

A adição de fibras de celulose não altera quimicamente o ligante, mas melhora as propriedades físicas do produto final, permitindo o uso de um teor elevado de ligante. As fibras orgânicas (celulose) destinadas ao uso em misturas asfálticas tipo SMA devem atender a certas características, conforme definido pela NCAT (1999) citada por REIS (2002).

Tabela 2 - Características exigidas para as fibras de celulose segundo NCAT

Características	Fibra Orgânica
Comprimento máximo, mm	6
Quantidade < 150 µm (%)	63 a 77
Teor de Cinzas (%)	17 a 19
pH	6,5 a 8,5
Absorção de óleo (%)	4,0 a 6,0
Teor de umidade máximo (%)	5

Segundo Shen e Paten (2010), a fibra Tencel Áustria 2012 é produzida pela fabricante Lenzing usando tecnologia Lyocell, um processo à base de solvente. A principal característica desta fibra é o fornecimento de energia para sua produção, que a partir de 2012 é totalmente baseado na energia recuperada da incineração de resíduos sólidos municipais (MSWI). Essa abordagem demonstra um compromisso com a sustentabilidade, utilizando recursos renováveis e reduzindo o impacto ambiental associado à produção de fibras celulósicas.

3.4. Adição de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas

A adição de fibras é crucial em misturas de asfalto do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) para evitar o escorrimento, que deve ser

mantido abaixo de 0,3%. Estudos mostram que fibras de coco podem atender a essa exigência com uma incorporação de 0,5 a 0,7%. No Brasil, onde o coco é abundantemente produzido, sua aplicabilidade como substituto para a celulose importada é relevante. As fibras de coco formam uma película ao redor dos agregados, retardando a oxidação, a penetração de umidade e a separação, aumentando a resistência ao desgaste do asfalto.

A utilização de uma camada de rolamento com misturas asfálticas mais resistentes e duráveis, como o SMA, tem sido uma alternativa para reduzir os custos de manutenção viária. Amplamente utilizado em países como Alemanha, Bélgica, Estados Unidos e Canadá, o SMA é empregado em vias com tráfego intenso e pesado, além de aeroportos.

As fibras de coco são obtidas da camada fibrosa externa do coco e têm resistência à tração variando de 71 a 176 MPa. Suas dosagens típicas em misturas asfálticas estão entre 0,15% e 0,7% do peso. O processo de trituração para obtenção das fibras pode ser feito por imersão em água ou por métodos mecânicos. As principais características da fibra de coco estão resumidas na tabela a seguir:

Tabela 3 - Características e propriedades da fibra de coco

Características do granulado	Resultados
Comprimento médio do granulado	10-20mm
Espessura média	0,1mm
Quantidade (percentual em peso da mistura)	0,5%-0,7%
PH	5,4
Condutividade Elétrica (CE)	1,8 dS/m
Capacidade de troca catiônica (CTC)	92
Relação C/N	132
Massa específica	70 g/L
Retenção de água	538 ml/L
Capacidade de aeração	45,5%
Porosidade	95,6%

3.5. Avaliação do Custo de Ciclo de Vida (ACCV)

As fibras de coco adicionam custos ao pavimento asfáltico, os quais variam conforme o tipo e a dosagem da fibra. No entanto, espera-se que as fibras tragam melhorias nos parâmetros de desempenho, justificando uma análise econômica para viabilizar sua adição. Uma abordagem realizada por Souliman et al. (2019) determinou que o custo-benefício médio da mistura asfáltica reforçada com fibra de coco é 4,52 vezes maior do que o da mistura asfáltica com celulose.

Além disso, a avaliação de custo do ciclo de vida (ACCV) pode proporcionar uma comparação de custos entre as misturas asfálticas reforçadas com fibra de coco e aquelas contendo celulose (Qadir et al., 2018; Lu et al., 2020). Utilizando a ACCV, é possível comprovar o substancial custo-benefício da mistura asfáltica reforçada com fibra, chegando a até 48,9%.

4 METODOLOGIA

4.1. Softwares

4.1.1. OpenLCA

O projeto de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi elaborado utilizando o software de código aberto OpenLCA®. Este software

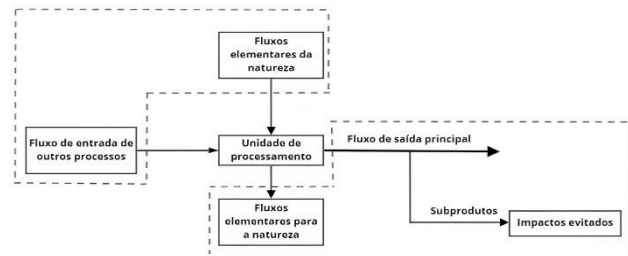
oferece diversas funcionalidades para a gestão de informações do ciclo de vida e é disponibilizado gratuitamente pela desenvolvedora GreenDelta GmbH.

A natureza de código aberto do OpenLCA traz várias vantagens para os usuários, incluindo custos reduzidos de aquisição e a capacidade de personalizar o software de acordo com demandas e preferências específicas. Além disso, essa característica proporciona maior transparência aos cálculos e modelagens realizadas.

O software representa uma ferramenta robusta para a avaliação de impacto ambiental. Sua interface permite o compartilhamento de bancos de dados, fluxos elementares e outros dados de referência, os quais foram harmonizados em coordenação com os respectivos provedores de dados. Isso viabiliza a comparação entre sistemas de produtos.

A Figura 6 esquematiza de maneira simplificada o processo realizado pelo software.

Figura 6 - Esquema de fluxos de processamento do Software OpenLCA



4.1.2. Faarfield

Para o dimensionamento do pavimento, utilizou-se o software FAARFIELD 2.0, desenvolvido para o projeto e avaliação da espessura do pavimento em aeroportos, bem como para gerar relatórios sobre a resistência do pavimento. Esse software adota o método ACN/PCN (Número de Classificação da Aeronave e o método do Número de Classificação de Pavimento), estabelecido pela OACI (Organização de Aviação Civil Internacional), para avaliar a resistência dos pavimentos de aeródromos.

No software, são inseridos os materiais constituintes dos pavimentos e suas respectivas espessuras, conforme especificações do projetista. Além disso, são informados o volume de tráfego, a estimativa do tempo de vida do pavimento e a aeronave crítica para o dimensionamento da pista. Com esses dados, o software realiza o dimensionamento de acordo com o método ACN/PCN.

4.2. Base de Dados

As Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) das misturas SMA com fibras de coco e fibras de celulose foram realizadas conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR ISO 14044 (2009). Para isso, foram utilizados dados do banco de dados Ecoinvent® como referência.

4.3. Escopo

O escopo deste estudo será focado na utilização das fibras de coco, com análise comparativa baseada em diversos estudos

anteriores (MOURÃO, 2003; VASCONCELOS, 2004). O sistema do produto considerará desde a extração da fibra de coco até sua incorporação em misturas asfálticas, incluindo o consumo de energia e insumos durante os processos.

Na pesquisa, foram utilizadas fibras de coco com as características apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 4 - Características da fibra de coco

Características do granulado	Resultados
Comprimento médio do granulado	10-20mm
Espessura média	0,1mm
Quantidade (percentual em peso)	0,5% a 0,7%

Os parâmetros obtidos por Vale et al. (2007) serão os dados primários a serem inseridos no software de ACV. A partir da quantificação dos processos envolvidos na produção da mistura asfáltica, será possível simular os impactos ambientais decorrentes da adição das fibras na mistura.

Além disso, foram estabelecidos diferentes teores para fibras de coco e fibras de celulose, conforme apresentado por Vale et al. (2007), que estabelece a quantidade de fibras incorporadas à mistura asfáltica para atender às normas. Na Tabela 5, são apresentados os teores utilizados nas misturas:

Tabela 5 - Teores de fibras nas misturas asfálticas SMA

Mistura	Teor de fibras (%)
SMA com fibra de Celulose	0,3 a 0,5
SMA com fibra de Coco	0,5 a 0,7
SMA sem fibras	0

O escopo também inclui a comparação do SMA com fibras de celulose importadas da marca LENZING. O produto é composto por 66,6% em peso de ARBOCEL ZZ 8-1 (fibra) e 33,3% de asfalto.

4.4. Unidade Funcional

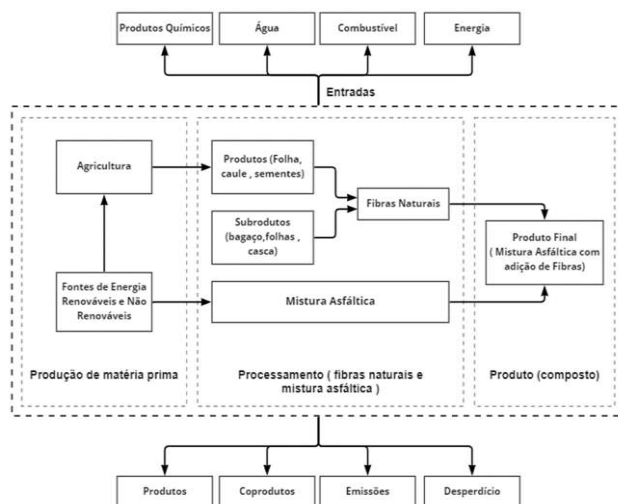
A unidade funcional adotada é a pavimentação de um trecho de faixa de pista de pavimento aeroportuário com SMA, com uma área de 1m². Para a análise, a unidade declarada tanto para as fibras de celulose quanto para as fibras de coco foi estabelecida como 1 tonelada.

4.5. Limites do Sistema

O escopo da ACV foi definido com base na construção de uma faixa de pavimento aeroportuário, abrangendo desde a plantação e extração das fibras de coco até a execução do pavimento com a mistura asfáltica modificada. Foram considerados os processos para a fabricação do ligante asfáltico, produção de agregados, operações da usina, transporte e aplicação. Além disso, foram analisados os processos de produção e processamento das fibras de coco e celulose, bem como sua adição na mistura asfáltica, levando em consideração o consumo de energia e as emissões associadas.

Os limites para o sistema foram implantados considerando a extração dos materiais para a elaboração da mistura SMA até a construção de uma faixa de pavimento aeroportuário no aeroporto de Aracaju-SE, assim como é apresentado na figura a seguir:

Figura 7 - Limites da produção da mistura asfáltica modificada



4.6. Critérios de Alocação

Para todos os processos de obtenção de fibras e mistura asfáltica, optou-se pelo critério de alocação mássica. Essa escolha se deve ao fato de que os produtos resultantes do beneficiamento da casca de coco e das fibras de celulose não são integralmente utilizados na produção da mistura asfáltica.

4.7. Inventário de Dados

4.7.1. Fibras de Coco

Foram coletados dados primários para os processos de produção agrícola, processamento da água de coco e beneficiamento da casca de coco, conforme Freire (2015). O levantamento das informações sobre a produção agrícola foi realizado em uma fazenda no município de Paraipaba-CE, entre novembro de 2013 e maio de 2014. Os dados relacionados ao processo de extração de água de coco e beneficiamento da casca foram obtidos por meio de visita e entrevista em uma unidade produtiva no Ceará, em 2013.

O consumo de energia elétrica na produção dos painéis foi estimado com medições in situ utilizando um alicate amperímetro digital. As emissões de CO₂, N₂O e CH₄ foram calculadas conforme o IPCC (2006), considerando fatores como mudança no uso da terra, uso de fertilizantes e queima de diesel. Outras emissões foram estimadas conforme métodos descritos por Nemecek e Schnetzer (2012).

Os dados de consumo e emissões dos processos de produção foram obtidos na base de dados Ecoinvent 2.2 (Frischknecht, Jungbluth, 2007). Os dados de carga poluente dos efluentes gerados no beneficiamento da casca de coco foram obtidos de Figueirêdo et al. (2008), e as emissões de formaldeído foram estimadas conforme Wilson (2010).

4.7.2. Fibras de Celulose

Os dados utilizados no estudo analítico podem ser divididos em dois níveis: dados específicos do local e dados específicos da

região. Os dados específicos do local são coletados diretamente dos locais de produção e incluem informações como balanços de energia e material da produção de celulose e fibra, além de dados sobre distância e meios de transporte.

4.8. Categorias e Métodos de Avaliação de Impactos

Os impactos ambientais gerados na avaliação do ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até a construção do pavimento, serão analisados utilizando a Metodologia Recipe (ReCiPe). O Recipe oferece uma estrutura abrangente para avaliar múltiplos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos e serviços. Ela permite a quantificação e a comparação dos impactos em diversas categorias, como mudanças climáticas, uso da terra, toxicidade humana, entre outros.

Essa metodologia fornece métricas de sustentabilidade que permitem uma quantificação expandida dos efeitos potenciais, abrangendo aspectos como destruição da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, eutrofização, formação de smog fotoquímico, efeitos das partículas na saúde humana, ecotoxicidade, entre outros. Assim, a aplicação da Metodologia Recipe proporciona uma análise mais abrangente e holística dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida do pavimento.

4.9. Dimensionamento do Pavimento Aeroportuário – Método FAA

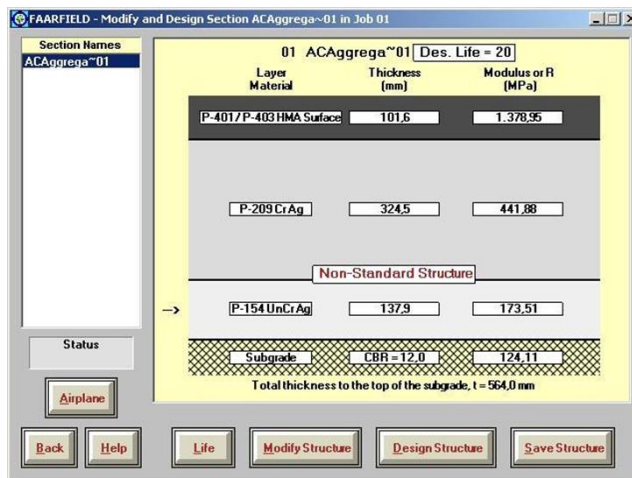
Para o dimensionamento do pavimento de Aracaju, foram consideradas a demanda de aeronaves do aeroporto e a composição das camadas do pavimento. De acordo com as diretrizes da AC 150/5320-6E, a espessura total do pavimento prevista é de 22,2 polegadas, equivalente a aproximadamente 56,4 centímetros. Isso implica em uma exigência mínima de camada de base de cerca de 12 polegadas (30 centímetros), para um subleito com CBR de 12% (Ramos, 2015).

Figura 08 - Tipos de aeronaves com seu peso máximo de decolagem e a demanda considerada no projeto de Aracaju

Airplane Name (t)	Gross Weight (tns)	Annual Departures	% Annual Growth	Total Departures
B737-800	79.243	218	4,80	6.453
A320-100	68.400	475	5,50	14.725
Fokker-F-28-1000	30.164	90	4,80	2.664
B737-300	63.503	325	4,80	9.620
B737-700	70.307	218	4,80	6.453
B767-300	163.747	218	4,80	6.453

Em seguida, os dados foram introduzidos no software FAARFIELD, e após o processamento foram extraídos os dados necessários para realizar os dimensionamentos das faixas do pavimento.

Figura 09 - Estrutura do pavimento



Dessa forma, ratificou-se a utilização da seguinte seção para os pavimentos flexíveis novos da ampliação da pista de pouso e decolagem, das novas pistas de táxi e da reconstrução da área do pátio em pavimento flexível:

- Reforço e compactação do subleito com material CBR >12%: 20 cm;
- Sub-base estabilizada granulometricamente (material de jazida), obtendo-se no final um CBR ≥ 30%: 15 cm;
- Base em Macadame Hidráulico com CBR ≥ 80%, em duas camadas de 15 cm: 30 cm;
- Revestimento (binder) em CBUQ: 4 cm;
- Revestimento (capa) em SMA: 4 cm;

Na pista de pouso e decolagem, recomendou-se a estrutura anteriormente dimensionada para a faixa central de 15,00 m (7,50 m para cada lado do eixo). Para os outros 15 m em cada lado do eixo, recomendou-se 0,7 T (considerando 70% do tráfego), o que resultou na seguinte estrutura:

- Reforço e compactação do subleito com material CBR >12%: 20 cm;
- Sub-base estabilizada granulometricamente (areia importada e material de jazida), obtendo-se no final um CBR ≥ 30%: 15 cm;
- Base em Macadame Hidráulico com CBR ≥ 80%: 25 cm;
- Revestimento (binder) em CBUQ: 4 cm;
- Revestimento (capa) em SMA: 4 cm.

Já para os acostamentos, recomendou-se 0,4 T (considerando 40% do tráfego), o que resultou em:

- Reforço e compactação do subleito com material CBR >12%: 20 cm;
- Sub-base estabilizada granulometricamente (areia importada e material de jazida), obtendo-se no final um CBR ≥ 30%: 15 cm;
- Base em Macadame Hidráulico com CBR ≥ 80%: 18 cm;
- Revestimento em CBUQ: 4 cm

4.10. Análise dos Dados Obtidos

Conforme a norma ISO 14044:2006, a análise envolve a normalização dos processos para identificar as categorias de impacto. Por meio dessa abordagem, os efeitos ambientais mais significativos serão classificados, com base na análise dos fluxos de entrada e saída obtidos a partir dos resultados do software. Isso possibilitará a comparação técnico-econômica entre as principais soluções abordadas.

5. RESULTADOS

5.1. Dados Brutos

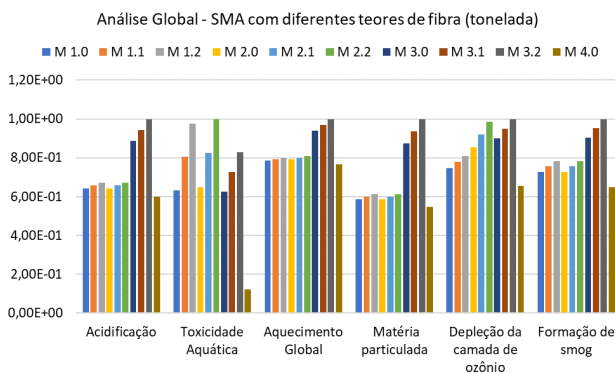
Os dados coletados foram obtidos a partir da análise de 6 categorias de impacto, sendo elas: acidificação, aquecimento global, toxicidade aquática, matéria-particulada, depleção da camada de ozônio e formação de smog. A partir dos gráficos é possível verificar as tendências no uso de diferentes teores de fibras, e o reflexo nos impactos ambientais.

Tabela 6 - Classificação das misturas para avaliação de impacto ambiental

Mistura	Teores de Fibra
M 1.0	SMA com Fibra de Celulose (Lenzing Viscose Austria) - 0.3%
M 1.1	SMA com Fibra de Celulose (Lenzing Viscose Austria) - 0.4%
M 1.2	SMA com Fibra de Celulose (Lenzing Viscose Austria) - 0.5%
M 2.0	SMA com Fibra de Celulose (Tencel Austria) - 0.3%
M 2.1	SMA com Fibra de Celulose (Tencel Austria) - 0.4%
M 2.2	SMA com Fibra de Celulose (Tencel Austria) - 0.5%
M 3.0	SMA com Fibra de Coco - 0.5%
M 3.1	SMA com Fibra de Coco - 0.6%
M 3.2	SMA com Fibra de Coco - 0.7%
M 4.0	SMA sem Fibras

5.2. Dados Normalizados

Figura 10 - Contribuição normalizada sem os pesos relativos das categorias de impacto global – SMA com diferentes teores de fibra.

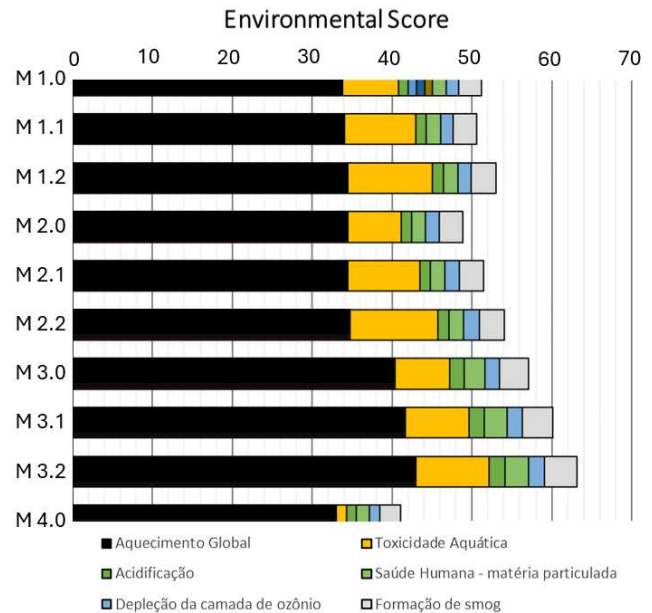


Após a análise dos dados normalizados sem os pesos de relevância global, verifica-se que os resultados de aquecimento global são os maiores da série de classificação, seguidas pela ecotoxicidade de água doce. Portanto, persiste a tendência dos

efeitos ambientais em razão do acréscimo dos agregados nas misturas.

O Environmental Score, ou pontuação ambiental, é uma medida que avalia o impacto ambiental de um determinado produto, processo ou atividade. Essa pontuação é geralmente calculada com base em uma variedade de critérios ambientais, como consumo de recursos naturais, emissões de poluentes, geração de resíduos e potencial de degradação ambiental.

Figura 09 - Contribuição relativa (%) dos processos individuais para as emissões de produção de 1ton de SMA para as pontuações da categoria de impacto



5.3. Análise de unidade funcional de 1m² de sma com fibras

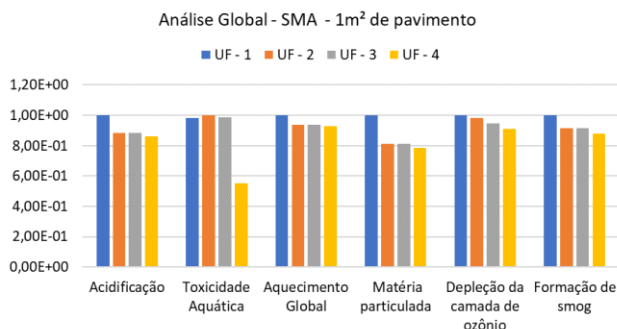
Levando em consideração o dimensionamento do pavimento, será realizado a análise feita anteriormente, repetindo-se os critérios de análise de impacto para 1m² de pavimento construído. Desta forma, garantindo os parâmetros mecânicos e estruturais, são comparadas as misturas asfálticas SMA com adição de fibras de coco e as com adição de fibra de celulose. Para a análise foram considerados os teores ótimos das fibras, sendo de 0,5% para fibras de coco e 0,3% para as fibras de coco. Além disso foram considerados apenas dois tipos de fibras de celulose, as quais obtiveram menor impacto ambiental na avaliação de impactos.

Tabela 7 - Classificação das unidades funcionais

Pavimento	Unidade Funcional
UF - 1	1m² de SMA com Fibra de Coco - 0,5% de teor
UF - 2	1m² de SMA com Fibra de Celulose (Tencel Austria 2012) - 0,3% de teor
UF - 3	1m² de SMA com Fibra de Celulose (Lenzing Viscose Austria) - 0,3% de teor
UF - 4	1m² de SMA sem Fibras

5.4. Dados Normalizados

Figura 11 - Contribuição normalizada sem os pesos relativos das categorias de impacto global – SMA com diferentes unidades funcionais.



Após analisar os dados normalizados das unidades funcionais, observa-se um padrão nos impactos ambientais. Além disso, pode-se inferir que o UF-4 apresenta uma menor toxicidade aquática em comparação com os demais.

6. CONCLUSÃO

A análise dos principais aspectos e impactos ambientais potenciais em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para misturas asfálticas do tipo SMA com adição de fibras de coco e fibras de celulose revelou que a fabricação das fibras de coco foi a etapa que mais contribuiu para os potenciais impactos ambientais. No entanto, essa contribuição não foi tão significativa em comparação com a produção da fibra de celulose. Essa descoberta fortalece a viabilidade da substituição da fibra de celulose pela fibra de coco, visto que a redução dos impactos ambientais poderia ser substancial, sem comprometer a qualidade do produto final.

Além disso, outro fator relevante a ser considerado é o aspecto econômico. Embora a redução dos impactos ambientais seja uma consideração crucial, a viabilidade financeira desempenha um papel fundamental na adoção de novas tecnologias e materiais. Se a substituição da fibra de celulose pela fibra de coco resultar em benefícios econômicos significativos, isso poderia incentivar ainda mais sua adoção e implementação em larga escala.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, da Universidade de Brasília (PPGG/UnB), ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos NGM/UnB, ao CNPq e a CAPES na colaboração e suporte.

8. REFERÊNCIAS

BARBIERI, J.C. Gestão ambiental empresarial: Conceitos, modelos e instrumentos. 2. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 379 p, 2009.
 BERNARDINA, F. P. D.; VELLOSO, R.Q.; CASAGRANDE, M.D.T.; Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico dos Solos Reforçados. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, p.123, 2019.
 CORDOVIL, R. M. Um programa de gerência de pavimentos para O comando da aeronáutica - Estudo de caso: Bases aéreas da Região sul, Porto Alegre, 2010.

FONTENELE, S. E. R., Cultura do Coco no Brasil: Caracterização Do Mercado Atual e Perspectivas Futuras. Ribeirão Preto, 2005.
 FIGUEIRÊDO, M.C. B. Modelo de Avaliação do Desempenho Ambiental de Inovações Tecnológicas Agroindustriais, Considerando o Conceito de Ciclo de Vida e a Vulnerabilidade Ambiental: AMBITEC-Ciclo de Vida. 2008. Tese. 424 f. (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) – Programa De Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
 FILHO, O.C.; NILO, L.S.J.; LUEDEMANN, G. A avaliação de Ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas Públicas no brasil," Texto para Discussão 2205, Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2016.
 HEIJUNGS, R., GUINÉE, J.B., HUPPES, G., et al. Environmental Life Cycle Assessment of Products: Guide and Backgrounds, 1992.
 MOURÃO, F. A. L. Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA. Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
 NAPA-NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. Design and construction SMA mixtures: state of the practice, p. 43, 1999.
 PANK, Finnish Asphalt Specifications. Finnish Pavement Technology Advisory Council – PANK, Helsinki, 1995.
 QADIR, A., GAZDER, U., ALI, S. Comparison of SBS and PP Fibre asphalt modifications for rutting potential and life cycle Costs of flexible pavements. Road Materials and Pavement Design, .19, p.484–493, 2018.
 RAMOS, F.R.Q.; Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em Pavimentos aeroportuários - estudo de caso: Aeroporto de Aracaju-SE. 174 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
 REIS, R. M. I. M (2002) Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado. Tese de M. Sc., EPUSP-USP, Brasil.
 SENHORAS, E. Estratégia de uma agenda para a cadeia Agroindustrial do coco. Campinas: ESC, 2003.
 SHEN, L., PATEL, M.K., LCA single score analysis of Man-made Cellulose fibres., Lenzinger Berichte 88 p60-66, 2010.
 SILVA, D. A. L. Avaliação do Ciclo de Vida da Produção do Painel MDP no Brasil. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São CarlosSP, 2012.
 VALE, A.C.D.; SOARES, J.B.; CASAGRANDE, M.D.T. Aplicabilidade de fibras de coco em misturas asfálticas tipo SMA: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 4., 2007, ABPG, Campinas, 2007.
 VALE, A.C.D.; CASAGRANDE, M.D.T.; SOARES, J.B. Behavior Of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two Design methods. J. Mater. Civ. Eng., 26, 457–465, 2013.
 VASCONCELOS, K. L. Comportamento mecânico de misturas Asfálticas à quente dosado pelas metodologias marshall e Superpave com diferentes granulometrias. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, p.149, 2004.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.