

CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA ESCOLHA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS, SEMIRRÍGIDAS OU INVERTIDAS

Vinícius Maróstica Alberto¹, Carlos Yukio Suzuki², Caio Rubens Gonçalves Santos³, Felipe Issa Kabbach Junior⁴, Flaviane Melo Lopes Vallejo⁵, Gabriel Garcia de Abreu Lima⁶

^{1, 3, 5}Instituto Mauá de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Praça Mauá, 1, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

email: vinicius.alberto@maua.br <http://www.maua.br>

^{2, 4} Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Prof. Almeida Prado, 83, São Paulo, SP, Brasil.

⁶ Planservi Engenharia Ltda., Av. Brigadeiro Faria Lima, 1461, São Paulo, SP, Brasil.

Sumário

O presente trabalho tem como objetivo incluir uma parcela ambiental no procedimento de escolha do tipo de estrutura de pavimentos novos, através da avaliação quantitativa de emissões de poluentes e consumos de energia e água. Em uma primeira etapa tal avaliação foi realizada com auxílio do programa computacional PaLATE, através de uma análise unitária que permite classificar os materiais estudados de acordo com o impacto ambiental gerado. Na etapa posterior, utilizando resultados da simulação de matrizes de estruturas de pavimento, são obtidos modelos de previsão das emissões de CO₂ por tipo de estrutura a partir do número estrutural das mesmas.

Palavras-chave: Pavimentos; Emissão de GEE; Desenvolvimento sustentável; Avaliação da ecoeficiência.

1 INTRODUÇÃO

O uso de energia e a emissão de gases do efeito estufa (GEE), ou Greenhouse gases (GHG), tem recebido grande atenção da indústria nas duas últimas décadas, principalmente pela crescente preocupação com o aumento da temperatura global, tema tratado culminando em grandes acordos entre as nações tais como o Protocolo de Montreal de 1987, o Protocolo de Kyoto de 2005 e o mais recente Acordo de Paris.

Termos como, “Impactos Ambientais”, “Desenvolvimento Sustentável”, “Eficiência Energética”, “Aquecimento Global”, “Efeito Estufa” e “Ecoeficiência”, são cada vez mais frequentes dado o reconhecimento no meio científico e político da importância da preservação do meio ambiente.

O conceito de sustentabilidade em rodovias é atualmente bastante discutido, principalmente na utilização de materiais reciclados como base e sub-base de pavimentos; porém, sob vários aspectos, tal questão deve ser tratada de uma forma bem mais abrangente na área de infraestrutura viária. Deve-se analisar criticamente todo o processo de definição da estrutura do pavimento rodoviário, desde a obtenção e processamento dos materiais até o consumo de energia e emissão de poluentes pelos veículos que trafegam pela via, sendo esses dois últimos fatores também dependem da qualidade ao rolamento do pavimento em análise e das características geométricas da via.

Construções, reconstruções e reabilitações de pavimentos consomem um grande volume de energia tanto para obtenção e processamento dos materiais quanto na aplicação e execução propriamente dita dos serviços conforme indicado em [1]. Logo, devem ser computados os poluentes emitidos pelas máquinas e equipamentos utilizados, assim como o consumo de energia e água. Softwares como GreenroadsTM e PaLate (*Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects*) são capazes de calcular e comparar os parâmetros para diferentes tipos de intervenções e de situações. O software Greenroads foi desenvolvido com o intuito de avaliar a sustentabilidade de rodovias e permite aos projetistas, construtores e órgãos públicos tomadas de decisões coesas, provendo uma escala de desempenho de sustentabilidade para o projeto e construção da via. Para tal, o Greenroads, define atributos de sustentabilidade da rodovia, provê um sistema de avaliação de sustentabilidade da mesma e contempla uma coletânea de soluções e práticas sustentáveis tanto de projeto quanto de construção. Similar ao Greenroads, pode ser citado o GreenPave, descrito no manual Canadense do MTO de 2013 [2]. Já o software

PaLate é capaz de quantificar os poluentes emitidos e o consumo de energia com auxílio de amplas referências bibliográficas e catálogos de máquinas, materiais e tipos de serviço.

O presente trabalho tem como objetivo básico a proposição de ferramentas de avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes para auxiliar na escolha, sob a ótica ambiental, dos tipos de materiais mais adequados na fase de elaboração do projeto de uma nova estrutura de pavimento.

Propõe-se, dessa forma, a consideração de parcela ambiental para análise de estruturas de pavimento, para que a mesma possa ser acrescida na metodologia convencional de cunho técnico-econômico.

No Capítulo 5 do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) [3] estão descritas as principais preocupações e considerações relacionadas ao meio ambiente no projeto e nos serviços de pavimentação, enfatizando a importância de realização de Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e dos respectivos Relatórios de Impactos ao Meio Ambiente (RIMA), os quais são de submissão obrigatória aos órgãos estaduais competentes segundo as resoluções ambientais brasileiras. Da mesma forma, a Instrução de Projeto para Elaboração do Plano Básico Ambiental para Licença Ambiental de Instalação [4], definida pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) apresenta em seu Capítulo 6 preocupações e recomendações relacionadas à qualidade do ar nos serviços de pavimentação, porém apenas com caráter qualitativo. Nem o manual do DNIT no âmbito federal e nem a instrução de projeto de pavimentação do DER-SP preveem formas de avaliação do impacto ambiental dos serviços de pavimentação, muito menos preveem uma metodologia que sirva como caráter de escolha de uma estrutura de pavimento.

Atualmente, além da prática não ser comum, os principais órgãos brasileiros, nacionais, estaduais e municipais, não indicam ou exigem tal avaliação no momento de se projetar alternativas de construção ou reabilitação de pavimentos. Um projeto que atenda às necessidades do ser humano não pode prescindir de questões inerentes à sustentabilidade, que minimizem as agressões ao meio ambiente.

Em [5] observa-se que o transporte rodoviário foi responsável por 32% do consumo de energia da Europa e 28% do CO₂ emitido no continente em 2013, considerando a construção, a reabilitação e a operação das vias.

Dessa forma, fica evidente a importância de que a quantificação de emissões e consumos seja considerada na elaboração de projetos e na execução de obras de infraestrutura viária, através da adoção de soluções sustentáveis e coerentes com os objetivos da ONU e do Governo Brasileiro de redução da emissão de poluentes atmosféricos e do consumo de energia.

2 SOFTWARES PARA ANÁLISE AMBIENTAL

Segundo [6] a previsão das emissões e qualidade do ar pode ser dividida basicamente entre duas metodologias principais: estatística ou por métodos numéricos.

Em [7] é citado que a metodologia estatística, como o próprio nome sugere, busca relacionar estatisticamente variáveis meteorológicas e de qualidade do ar levando ao cálculo das emissões. Já a metodologia numérica, consiste na análise de fenômenos químicos e físicos, buscando modelos que descrevam tais fenômenos. Tais modelos cada vez mais são compilados em programas computacionais, para previsão da emissão de poluentes.

Na bibliografia consultada identificou-se um número limitado de softwares que são capazes de computar a emissão de poluentes, sendo menor ainda a gama de programas capazes de lidar especificamente com serviços relacionados à infraestrutura rodoviária.

São resumidas em [8], as cinco ferramentas que estão voltadas para avaliação do ciclo de vida de pavimentos rodoviários e que são capazes de computar as emissões de poluentes nas etapas de construção e manutenção das estruturas de pavimento.

Os softwares citados em [8] são: GaBi, software alemão cuja base de dados é proveniente da indústria alemã e que utiliza bancos de dados americanos; DuboCalc, proveniente da Holanda cuja base de dados é local; VTTI/UC, desenvolvido nos EUA e com base de dados proveniente exclusivamente da literatura; ECORCE-M, programa francês com base de dados proveniente da literatura e da indústria; e PaLATE, programa também desenvolvido nos EUA que utiliza modelo EIO-LCA (*Economic Input-Output Life Cycle Assessment*) da Carnegie Mellon University.

Além destes, softwares de gerenciamento de pavimentos tais como o HDM-4, também possuem modelos de emissão de poluentes em seus códigos fonte, porém apenas para a fase de utilização da via, ou seja, modelos exclusivos para as emissões do tráfego atuante na via em estudo.

Dentre os softwares apresentados, apenas o PaLATE possui acesso liberado de restrições, sem custo de utilização e é inteiramente voltado para análise ambiental, ou seja, seus “outputs” (saídas), resumem-se às emissões de poluentes e consumos de água e energia. Os outros softwares citados são, em sua maioria, focados na análise do ciclo de vida do pavimento e na análise ambiental como complemento.

Por estes motivos, o PaLATE foi o programa computacional escolhido para desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Programa PaLATE

O PaLATE é uma ferramenta baseada em planilha do Microsoft Excel para avaliação dos ciclos de vida ambiental e econômico, concebida especificamente para serviços de pavimentação de estradas e rodovias. Suas premissas são discutidas em [9].

A ferramenta é capaz de apresentar, além de custos iniciais e totais ao longo do ciclo de vida do pavimento, dados de caráter ambiental tais como: consumo de energia e água; emissão de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), materiais particulados (PM₁₀), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb).

Como limitações, o PaLATE não computa as emissões na operação da via, ou seja, emissões de poluentes geradas pelos veículos que trafegam na rodovia. Além disso, não é possível simular com o programa alguns tipos de materiais, como macadame betuminoso e tampouco algumas novas técnicas construtivas como as misturas asfálticas mornas (WMA), solução considerada como ecologicamente apropriada em função de sua reduzida temperatura de trabalho.

3 ANÁLISE UNITÁRIA

Buscando entender o funcionamento do programa PaLATE e principalmente o comportamento das emissões de poluentes e consumo de energia que cada material produz, sugere-se uma avaliação unitária de diferentes tipos de materiais que são utilizados como revestimento, base e sub-base nas estruturas de pavimentos.

Inicialmente, buscou-se elencar diferentes tipos de materiais que poderiam ser inseridos no PaLATE dadas as limitações previamente citadas do mesmo. Desta forma, foram selecionados cinco tipos diferentes de materiais de revestimento e quinze tipos de materiais de base e sub-base, conforme listado a seguir:

- Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) convencional;
- CBUQ com 2% de Borracha em volume;
- CBUQ com 3% de Borracha em volume;
- Camada Porosa de Atrito (CPA);
- Stone Mastic Asphalt (SMA);
- Concreto de Cimento Portland (CCP);
- Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) com 6% de cimento em volume;
- BGTC com 5% de cimento em volume;
- Brita Graduada Melhorada com Cimento (BGMC) com 3% de cimento em volume;
- BGMC com 1% de cimento em volume;
- Brita Graduada Simples (BGS);
- Solo-Brita;
- Solo-Brita Cimento;
- Rachão;
- Solo;
- Solo Melhorado com Cimento (SMC) com 3% de cimento em volume;
- SMC com 6% de cimento em volume;
- Solo-Cimento (SC) com 9% de cimento em volume;
- SC com 12% de cimento em volume;
- Concreto Compactado com Rolo (CCR).

No funcionamento do PaLATE os dados de entrada de cada material são representados através dos seus respectivos volumes. Visando uma simulação uniforme, adotou-se a espessura de 1,0 cm para todos os materiais em uma área que é composta de 3,50 m de largura de faixa ao longo de uma extensão de 1000 m e com distância de transporte igual a 1,00 km. Desta forma, as emissões e consumos obtidos na simulação de cada material serão representadas

como emissões/consumos por centímetro-quilometro-faixa por quilômetro transportado, tornando simples a comparação e análise dos resultados para cada um dos materiais.

Realizou-se cada simulação no PaLATE e os resultados finais estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Resultados da Análise Unitária no PaLATE (consumos e emissões por cm.km.faixa)

Material	Energia [MJ]	Água [kg]	CO ₂ [kg]	NO _x [g]	PM ₁₀ [g]	SO ₂ [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]
CBUQ Convencional	114.108	38,91	6.089	40.526	18.623	934.218	22.526	0,157	7,590
CBUQ C/ 2% Borracha	114.905	38,84	6.582	41.842	17.935	937.235	22.605	0,157	7,657
CBUQ C/ 3% Borracha	115.322	38,80	6.830	42.574	17.605	938.749	22.650	0,157	7,691
CPA	109.474	38,55	5.886	38.363	15.996	782.696	22.264	0,157	7,536
SMA	137.645	48,93	7.418	48.040	19.403	941.060	28.241	0,200	9,572
CCP	113.980	43,40	7.954	96.789	36.423	74.320	47.887	0,147	9,968
BGTC C/ 6% Cim.	22.400	7,82	1.579	12.835	11.248	12.411	4.879	0,012	1,267
BGTC C/ 5% Cim.	20.301	6,75	1.432	10.996	10.999	10.458	4.230	0,010	1,090
BGMC C/ 3% Cim.	16.102	4,60	1.137	7.320	10.499	6.551	2.932	0,006	0,736
BGMC C/ 1% Cim.	11.904	2,45	843	3.643	10.000	2.645	1.634	0,002	0,381
BGS	9.847	1,38	699	1.973	9.783	702	999	0,000	0,206
Solo-Brita	6.544	0,91	465	1.686	6.300	477	721	0,000	0,140
Solo-Brita Cimento	17.623	6,41	1.243	11.022	8.052	10.385	4.042	0,010	1,045
Rachão	14.589	2,05	1.035	2.922	14.425	1.040	1.479	0,000	0,305
Solo	672	0,06	50	1.176	109	77	227	0,000	0,023
SMC 3% Cimento	7.245	3,33	512	6.715	1.148	5.955	2.197	0,006	0,560
SMC 6% Cimento	13.817	6,59	973	12.254	2.187	11.833	4.168	0,012	1,097
SC 9% Cimento	20.390	9,85	1.434	17.793	3.227	17.711	6.138	0,018	1,634
SC 12% Cimento	26.962	13,11	1.895	23.331	4.266	23.589	8.109	0,023	2,171
CCR	20.588	6,88	1.452	11.379	11.061	10.696	4.320	0,010	1,112

Devido à dificuldade na avaliação de limites e faixas de concentração máxima de poluentes, os valores apresentados no item anterior impedem a aplicabilidade de uma avaliação da ecoeficiência de uma estrutura de pavimento no momento do dimensionamento da mesma.

Por essa razão, buscou-se uma maneira de modificar os dados obtidos nas simulações, com o intuito de facilitar a utilização do conceito de sustentabilidade durante o do projeto e ao longo da construção de novas estruturas de pavimento. A forma encontrada consistiu no cálculo de índices individuais que permitem a avaliação da ecoeficiência de cada material analisado para cada tipo de poluente/consumo.

Os índices são calculados dividindo-se o consumo/emissão do material “n” pelo consumo/emissão do material de menor consumo/emissão do parâmetro analisado. Assim, é possível identificar a quantidade de vezes que um material é mais poluente do que outro.

$$IE = \frac{E_n}{E_1} \quad (1)$$

Onde: IE: Índice de Ecoeficiência

En: Emissão/Consumo do material “n”;

E1: Emissão/Consumo do material de menor emissão/consumo;

O quadro a seguir apresenta os valores calculados dos Índices de Ecoeficiência (IE) separados por consumo/emissão para todos os materiais analisados.

Quadro 2: Índices de Ecoeficiência

Material	IE _{Energia}	IE _{Água}	IE _{CO₂}	IE _{NO_x}	IE _{PM₁₀}	IE _{SO₂}	IE _{CO}	IE _{Hg}	IE _{Pb}
Solo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Solo-Brita	9,74	13,96	9,23	1,43	57,98	6,23	3,18	0,69	6,19
SMC 3% Cimento	10,78	51,20	10,15	5,71	10,56	77,79	9,69	12,68	24,77
BGS	14,65	21,26	13,85	1,68	90,04	9,17	4,41	0,52	9,10
BGMC C/ 1% Cimento	17,71	37,68	16,71	3,10	92,03	34,56	7,21	4,36	16,88
SMC 6% Cimento	20,56	101,39	19,29	10,42	20,13	154,59	18,39	24,36	48,54
Rachão	21,70	31,49	20,52	2,48	132,76	13,59	6,53	0,77	13,48
BGMC C/ 3% Cimento	23,96	70,73	22,55	6,22	96,63	85,59	12,94	12,16	32,56
Solo-Brita Cimento	26,22	98,58	24,64	9,37	74,11	135,67	17,83	20,39	46,25
BGTC C/ 5% Cimento	30,20	103,79	28,39	9,35	101,22	136,62	18,66	19,95	48,25
SC 9% Cimento	30,33	151,59	28,44	15,13	29,69	231,38	27,08	36,05	72,30
CCR	30,63	105,84	28,80	9,67	101,79	139,74	19,06	20,47	49,23
BGTC C/ 6% Cimento	33,32	120,32	31,31	10,91	103,52	162,14	21,53	23,85	56,09
SC 12% Cimento	40,11	201,78	37,58	19,83	39,26	308,17	35,78	47,73	96,07
CPA	162,87	593,20	116,71	32,61	147,22	10.225,42	98,24	323,81	333,50
CCP	169,57	667,80	157,72	82,28	335,21	970,95	211,29	303,30	441,11
CBUQ Convencional	169,76	598,79	120,72	34,45	171,40	12.204,95	99,39	323,93	335,89
CBUQ C/ 2% Borracha	170,95	597,63	130,50	35,57	165,06	12.244,37	99,74	323,92	338,85
CBUQ C/ 3% Borracha	171,57	597,09	135,42	36,19	162,02	12.264,14	99,94	323,94	340,36
SMA	204,78	752,95	147,08	40,84	178,57	12.294,34	124,61	412,08	423,59

3.1 Gráfico de Impressão Digital Ambiental para Escolha de Materiais

Apesar dos índices auxiliarem na visualização do quanto um material polui em relação ao outro, a metodologia apresentada até este ponto não possibilita a combinação dos poluentes e itens de consumo para análise completa do potencial poluidor de cada material estudado.

A metodologia encontrada que propiciou a junção dos poluentes em uma classificação única é a proposta por [10]. O gráfico gerado de sua pesquisa foi denominado de *Environmental Fingerprint* (Impressão digital ambiental em tradução livre).

Segundo descrito em [10], o objetivo do estudo era desenvolver uma ferramenta que seria de simples utilização para profissionais com experiência em Análise do Ciclo de Vida e que fosse de fácil entendimento para leigos no assunto. [10] enfatiza a importância de os resultados serem apresentados de uma forma em que estudos complexos sejam entendidos de maneira simples e rápida.

Com base na pesquisa desenvolvida pela BASF e tendo em vista a aplicação similar desenvolvida em [11], sugere-se a criação de gráfico de impressão digital ambiental para avaliação da ecoeficiência de diferentes tipos de materiais cuja utilização seria uma etapa complementar da análise técnico-econômica-ambiental no momento da escolha dos materiais.

Inicialmente, é sugerida a utilização dos dados de todos os poluentes e itens de consumo estudados até aqui, quais sejam: consumos de água e energia e emissões de CO₂, NO_x, PM₁₀, SO₂, CO, Hg e Pb. Considerando a utilização destes 9 itens, o gráfico proposto tem formato de eneágono regular, com a inserção de nove escalas de 0,0 a 1,0.

Para a criação das escalas, optou-se pela normalização dos Índices de Ecoeficiência encontrados e apresentados no tópico anterior. A normalização consiste em dividir cada IE pelo maior IE do item de consumo ou poluente em questão. Como exemplo, pode-se analisar o consumo de energia onde o IE normalizado do SMA seria igual a 1,000 pois é o item de maior consumo, enquanto o do solo seria igual a 0,005, ou seja, o valor de IE_{En} do solo dividido pelo valor de IE_{En} do SMA.

Com os valores de IEN, basta plotar as figuras geométricas para cada material. A Figura 1 apresenta o gráfico de impressões digitais ambientais sugerido.

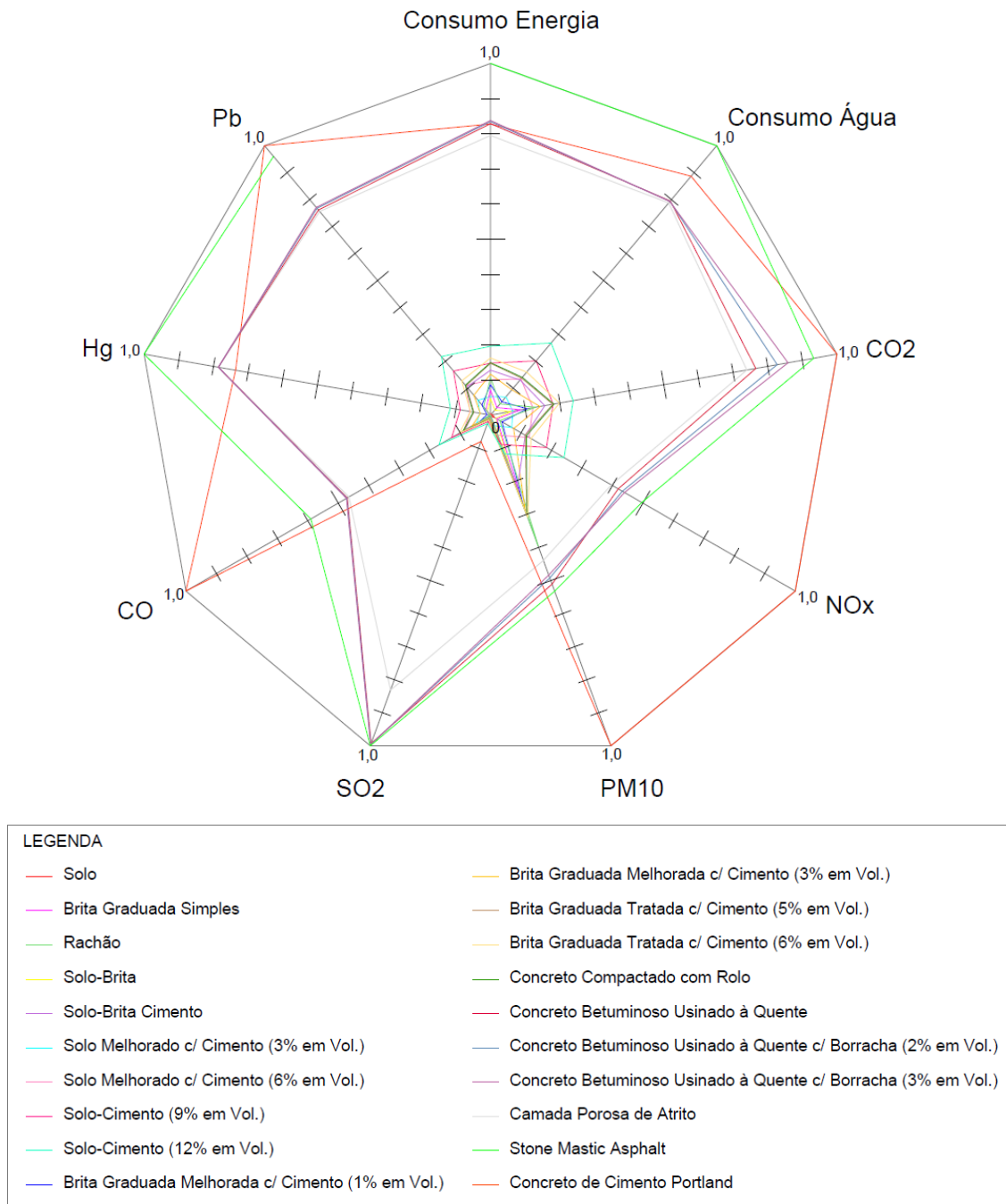


Figura 1 – Gráfico de Impressões Digitais Ambientais Sugerido

A solução gráfica deveria, em teoria, proporcionar uma forma mais clara de visualização e comparação entre os materiais; porém, dada a quantidade de materiais e parâmetros estudados, a visualização de alguns materiais, como o solo por exemplo, pode resultar prejudicada.

Sendo assim, sugere-se, adicionalmente à solução gráfica, o cálculo da área de cada figura, uma vez que, quanto menor a área da figura geométrica, mais ecoeficiente é o material.

O Quadro 3 apresenta os valores de área calculados já em ordem crescente.

Quadro 3: Índices de Ecoeficiência Normalizados

Material	Área	Posição
Solo	5,04E-05	1
Solo-Brita	0,002	2
BGS	0,004	3
SMC 3% Cimento em Vol.	0,007	4
BGMC C/ 1% Cimento em Vol.	0,009	5
Rachão	0,010	6
BGMC C/ 3% Cimento em Vol.	0,023	7
SMC 6% Cimento em Vol.	0,025	8
Solo-Brita Cimento	0,034	9
BGTC C/ 5% Cimento em Vol.	0,042	10
CCR	0,043	11
BGTC C/ 6% Cimento em Vol.	0,053	12
SC 9% Cimento em Vol.	0,054	13
SC 12% Cimento em Vol.	0,095	14
CPA	1,282	15
CBUQ Convencional	1,407	16
CBUQ C/ 2% Borracha	1,436	17
CBUQ C/ 3% Borracha	1,451	18
CCP	1,954	19
SMA	2,022	20

Como referência, a área máxima que se pode obter neste caso seria aproximadamente igual a 2,89. Para tanto, todos os valores de IEN teriam de ser iguais a 1,00.

4 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS

São sugeridas três matrizes diferentes de estruturas asfálticas, sendo uma para pavimentos flexíveis, uma para pavimentos semirrígidos e outra para pavimentos invertidos, de forma a permitir a análise da diferença na emissão de poluentes para cada uma de tais alternativas. A sequência das atividades básicas de tal metodologia é descrita a seguir:

- Definição das matrizes de solução com as características dos materiais para cada tipo de estrutura (Flexível, Semirrígida e Invertida);
- Análise mecanicista nos pontos críticos de cada estrutura de pavimento proposta, para retroanalisar o número N que a estrutura proposta pode suportar;
- Cálculo de SNC de cada estrutura proposta;
- Quantificação das emissões de CO₂ para todas as estruturas analisadas com o PaLATE;
- Análise do comportamento dos três tipos de estrutura.

As três matrizes recomendadas são provenientes de trabalhos propostos por [12], sendo que a matriz para pavimentos flexíveis foi publicada e as demais são provenientes de trabalhos ainda não publicados. As mesmas são apresentadas nos quadros a seguir.

Quadro 4: Matriz de Soluções - Flexível

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coef. Poisson
H _{CBUQ}	3 - 5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 – 3.000 – 3.750 – 4.500	0,35
H _{BASE}	15 - 30 - 45 - 60	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H _{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150	0,45

Quadro 5: Matriz de Soluções - Semirrígido

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coef. Poisson
H _{CBUQ}	5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 – 3.000 – 3.750 – 4.500	0,35
H _{BGTC}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	5.000 – 7.500 – 10.000	0,20
H _{BASE}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H _{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200	0,45

Quadro 6: Matriz de Soluções - Invertido

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coef. Poisson
H _{CBUQ}	5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 45 - 60	2.250 - 3.000 - 3.750 - 4.500	0,35
H _{BASE}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	75 - 150 - 225 - 300 - 375 - 450	0,40
H _{BGTC}	10 - 15 - 20 - 25 - 30	1.000 - 2.500 - 5.000 - 7.500 - 10.000	0,20
H _{SL}	-	25 - 50 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200	0,45

As matrizes propostas combinadas totalizam 298.608 diferentes casos que foram analisados mecanicamente e tiveram seu tráfego retroanalisado posteriormente. Destes casos foram excluídos todos aqueles cujo número N retroanalisado foi menor que 1×10^4 solicitações do eixo padrão, totalizando 68.449 casos retirados da análise.

Para os casos restantes, calculou-se o Número Estrutural Corrigido (SNC) e computaram-se as emissões de CO₂ para cada estrutura com auxílio do programa PaLATE. Procedeu-se então para a regressão não linear dos dados obtidos, da qual resultaram três modelos distintos de previsão das emissões de CO₂, sendo uma para cada tipo de estrutura. Os modelos obtidos são apresentados a seguir:

- Emissão de CO₂ para estruturas de pavimento flexível (tn/km.faixa)

$$ECO2_{FL} = 14,32 \cdot SNC^{1,260} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,83$$

- Emissão de CO₂ para estruturas de pavimento semirrígido (tn/km.faixa)

$$ECO2_{SR} = 24,47 \cdot SNC^{1,054} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,90$$

- Emissão de CO₂ para estruturas de pavimento invertido (tn/km.faixa)

$$ECO2_{IN} = 21,24 \cdot SNC^{1,139} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,92$$

5 CONTRIBUIÇÃO À AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA NA ESCOLHA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

O objetivo do presente estudo é apresentar uma proposição de procedimento para a inserção de etapa ambiental na escolha de estruturas de pavimento rodoviário. É possível observar com o que foi apresentado nos capítulos anteriores que uma avaliação ambiental possui elevado grau de complexidade, pois, além de envolver diversas variáveis, ainda não pode contar com estudos, especificações e modelos mais específicos e multidisciplinares na bibliografia que trata do tema.

Apesar das dificuldades encontradas, propõe-se como contribuição principal do presente trabalho uma sugestão metodológica de avaliação estrutural-econômica-ambiental para escolha de alternativas de pavimento asfáltico utilizando os modelos apresentados anteriormente.

São apresentados os passos da metodologia proposta:

- Definição dos parâmetros de projeto (tráfego e condição de suporte de subleito) e escolha dos materiais;
- Dimensionamento pelas metodologias vigentes e pertinentes (DNIT, DER, SIURB e etc.) e cálculo do SN;

- Verificação mecanicista das estruturas dimensionadas (fim da análise técnica);
- Estimativa das emissões de CO₂ (tn/km.faixa) para cada estrutura dimensionada utilizando as equações propostas (fim da análise ambiental);
- Estimativa do preço de cada solução (R\$/km.faixa) com auxílio da tabela de preços unitários pertinentes (SICRO, DER/SP, SIURB, SINAPI e etc.);
- Atribuição de preços às emissões de CO₂ com valores de crédito de carbono praticados pela bolsa de valores (etapa opcional);
- Ranquear Classificação das soluções por custo e por emissões;
- Avaliação da melhor opção de acordo com as premissas de projeto (fim da análise estrutural-econômica-ambiental).

A Figura 2 procura ilustrar a sequência metodológica proposta.

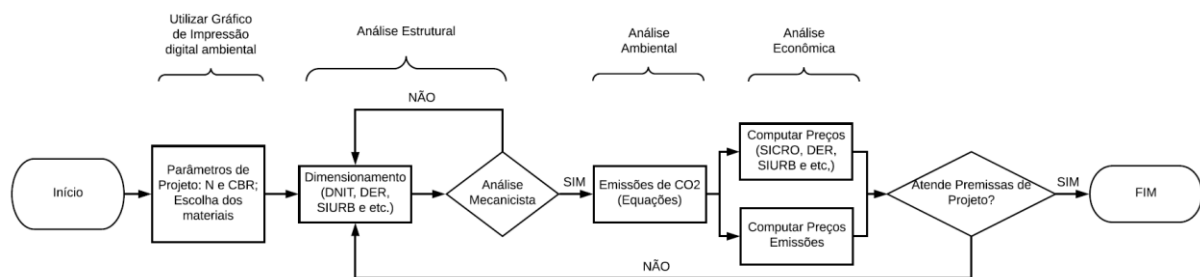


Figura 2 - Fluxograma da Análise Estrutural-Econômica-Ambiental

6 CONCLUSÕES

Apesar dos diversos poluentes gerados nos processos de produção dos materiais e execução do pavimento, recomenda-se que as emissões de CO₂ sejam utilizadas para a análise do impacto ambiental das soluções de pavimentação.

A análise proposta limita-se à seleção do tipo de pavimento e deve ser conduzida em uma etapa anterior ao projeto executivo, ou seja, na fase de anteprojeto ou projeto básico. Procurou-se demonstrar que a utilização do software PaLATE é suficiente e adequada para quantificar os impactos ambientais e os volumes de poluentes. Apesar do PaLATE não computar as emissões na operação da via, ressalta-se que estas emissões são importantes para análise do ciclo de vida do pavimento, devendo ser computadas sempre que possível.

Verificou-se que os materiais que podem ser utilizados na camada de revestimento emitem mais poluentes e geram maior consumo quando comparados aos materiais que são utilizados como base e sub-base de pavimentos.

O gráfico de impressão digital ambiental gerado ajuda na análise completa das emissões. Este gráfico, juntamente com a normalização dos Índices de Ecoeficiência, permitiram o cálculo das áreas dos polígonos de cada material, fornecendo com maior precisão uma classificação de ecoeficiência dos materiais que pode ser considerada durante a análise estrutural-econômica-ambiental para orientar a seleção dos materiais a serem utilizados. O procedimento proposto poderia ser considerado em uma certificação ambiental para classificar materiais e serviços, porém a análise deve sempre ser ponderada de acordo com as características mecânicas e técnicas de cada material a ser analisado.

Ao propor matrizes com um grande número de soluções no estudo de caso, foi possível encontrar equações que podem simular de maneira mais simples uma análise de emissões de CO₂, sem a utilização do programa PaLATE. Recomenda-se a utilização das equações na avaliação de estruturas de anteprojeto e/ou projeto básico, uma vez

que as mesmas representam adequadamente as emissões de CO₂ em função dos principais parâmetros do projeto e da estrutura.

As equações apresentadas e o gráfico de impressão digital ambiental configuraram-se como as principais ferramentas que este trabalho propõe como contribuição.

No item 5 do presente artigo, procurou-se, através da utilização das ferramentas apresentadas, inserir a parcela ambiental na análise da escolha do tipo de pavimento. O conceito proposto não pretende tornar a questão ambiental como fator determinante na escolha entre estruturas de pavimento, porém pretende torná-la parte a ser considerada na decisão.

Apesar do trabalho ser baseado na escolha do tipo estrutural do pavimento, ressalta-se que a questão ambiental deve ser considerada, essencialmente, na seleção do tipo de material e técnica construtiva a serem utilizados, buscando a solução mais sustentável possível.

A escolha da estrutura de um pavimento rodoviário através de análise estrutural-econômica-ambiental agrega não apenas valor social ao empreendimento, mas também contribui para que cada vez menos a humanidade necessite do adjetivo sustentável para a palavra desenvolvimento.

7 AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, à Planservi Engenharia e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo apoio acadêmico e profissional no desenvolvimento da presente pesquisa.

8 REFERÊNCIAS

1. M. Chappat, J. Bilal, *Sustainable Development: The Environmental Road of the Future, life cycle analysis*. Colas, Paris, 2003.
2. Ministry of Transportation Ontario - MTO, *Pavement Design and Rehabilitation Manual. 2nd Edition*. Material Engineering and Research Office, Ontario, 2013.
3. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, *IPR 719 – Manual de Pavimentação. 3. ed.* Rio de Janeiro, 2003.
4. Departamento de Estradas e Rodagem de São - DER/SP, *IP-DE-S00/004 – Elaboração do Plano Básico Ambiental para Licença Ambiental de Instalação*. São Paulo, 2007.
5. L. Dumitrescu, S. G. Maxineasa, I. M. Simion, N. Taranu, R. Andrei, M. Gavrilescu, *Evaluation of the Environmental Impact of Road Pavements From a Life Cycle Perspective*. Environmental Engineering and Management Journal, Romania, 2014.
6. United States Environmental Protection Agency - USEPA. *Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and PM_{2,5}) Forecasting Program*. Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina, 2003.
7. S. M. M. Rocha, *Previsão de Indicadores de Qualidade de Ar Exterior em Ambiente Urbano*. Faculdade de Economia do Porto, Porto, 2014.
8. J. M. Santos, S. Thyagarajan, E. Keijzer, R. F. Flores, G. Flintsch. *Pavement Life Cycle Assessment – A Comparison of American and European Tools*. Pavement Life-Cycle Assessment Symposium, Champaign, 2017.
9. A. Horvath, *A Life-Cycle Analysis Model and Decision-Support Tool for Selecting Recycled Versus Virgin Materials for Highway Applications*. University of California, Berkley, 2004.
10. P. Saling, A. Kicherer, B. Dittrich-Krämer, R. Wittlinger, W. Zombik, I. Schmidt, W. Schrott, S. Schmidt, *Eco-efficiency Analysis by BASF: The Method*. Landsberg, 2002.
11. T.D. Miller, H. U. Bahia, *Sustainable Asphalt Pavements: Technologies, Knowledge Gaps and Opportunities* University of Wisconsin, Madison, 2009.
12. F. M. LOPES, *Pavimentos Flexíveis com revestimento Asfáltico – Avaliação Estrutural a Partir dos Parâmetros de Curvatura da Bacia de Deformação*. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.