

CONSIDERAÇÕES SOBRE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

Gabriel Garcia de Abreu Lima¹; Carlos Yukio Suzuki²; Felipe Issa Kabbach Junior³, Caio Rubens Gonçalves Santos⁴; Flaviane Melo Lopes Vallejo⁵; Vinícius Maróstica Alberto⁶

¹ Planservi Engenharia Ltda., Av. Brigadeiro Faria Lima, 1461, São Paulo/SP, Brasil

email: gabriel@planservi.com.br <http://www.planservi.com.br/>

²³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, São Paulo/SP, Brasil

⁴⁵⁶ Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá, 1, São Caetano do Sul/SP, Brasil

Sumário

Diversos métodos de reciclagem de pavimentos têm sido aplicados no Brasil, particularmente, a reciclagem com adição de cimento. Entretanto, não há um método consolidado de dimensionamento estrutural dessa solução, o que gera dificuldades e muitas vezes desconfiância no seu emprego. Para se desenvolver um procedimento de dimensionamento que contemple esse tipo de solução, foram estudados métodos presentes na bibliografia internacional. Uma abordagem sobre cada método é apresentada, denotando seus principais aspectos, resultando em uma proposta de procedimento, de forma a atender ao método do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) aplicando-se conceitos de análise mecanicista.

Palavras-chave: Pavimentos, Reciclagem, Dimensionamento, Cimento.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação do meio ambiente, diante da extração de recursos e descartes de resíduos de demolição, bem como o emprego de novos materiais, tem tornado a reciclagem uma alternativa atraente. A utilização de pavimentos asfálticos com camada reciclada com adição de cimento contribui para a menor extração de agregados virgens da natureza e mitiga o descarte de resíduos oriundos de pavimentos demolidos. Para que a técnica de reciclagem seja adotada como uma alternativa de reabilitação de pavimentos deteriorados, as decisões devem ser pautadas por fatores técnicos e econômicos, não somente ambientais.

A técnica da reciclagem tem sido utilizada no Brasil, como alternativa de recuperação de pavimentos, desde meados de 1980; no entanto, existem poucos documentos técnicos que retratam essa tecnologia, quanto menos o seu dimensionamento estrutural, necessários para prever um desempenho adequado ao pavimento.

2. RECICLAGEM PROFUNDA COM CIMENTO

Conceitos de sustentabilidade como reuso e reciclagem estão intimamente ligados à origem das técnicas de pavimentação. A reciclagem também está presente, no processo de reaplicação de materiais do próprio pavimento, assim como na incorporação e utilização de resíduos oriundos das mais diversas áreas da indústria, como borracha (pneus), escórias de aciaria, resíduos da construção civil e demolição, cinzas volantes, areias de fundição, entre outros.

No caso de reutilização de componentes do próprio pavimento, o material reciclado composto unicamente por revestimento asfáltico é denominado material asfáltico recuperado (RAP), do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*, sendo esta a alternativa mais conhecida. Entretanto, há processos que reciclam materiais além do revestimento, como, por exemplo, a reciclagem profunda, onde os materiais do revestimento asfáltico e da infraestrutura do pavimento – sendo granular, cimentada ou asfáltica, são incorporados na nova mistura.

Denomina-se reciclagem profunda o processo de fresagem em que o material retirado compreende o revestimento, parte ou a totalidade da camada de base e até mesmo da sub-base [1], sendo tal processo usualmente designado na bibliografia pela sigla FDR (*Full-Depth Reclamation*).

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais reciclados é essencial para realizar o seu dimensionamento e, em consequência, para determinar as espessuras necessárias da camada reciclada e da camada de revestimento sobrejacente. No entanto, são necessários estudos para a estimativa das propriedades mecânicas do material reciclado.

De forma conveniente, o projetista determina uma composição da mistura reciclada, com base em estudos das propriedades mecânicas dos materiais coletados no local. Para critérios de dimensionamento, as misturas adotadas apresentam características de rigidez semelhantes às misturas em solo-cimento, sendo que é recomendável um teor de cimento igual ou superior a 3% em peso na mistura. No Brasil, segundo [2], as taxas de cimento utilizadas em obras de reciclagem variam de 3% a 4% em peso na mistura e baixos teores são empregados para mitigar os efeitos nocivos da retração do cimento e da rigidez exacerbada.

Segundo [3], quanto maior o teor de asfalto na mistura reciclada, menor é o módulo de resiliência (MR) resultante. Isto é justificado no estudo de [4], onde a película do ligante que envolve os grãos do material fresado tem influência nas propriedades da mistura, facilitando o deslizamento de uma partícula sobre a outra, diminuindo assim o atrito interno e conferindo ao fresado um componente de deformação viscosa na mistura.

Em diversos estudos realizados com dosagens de mistura reciclada com cimento, entre eles [5], relata-se que a predominância de material asfáltico na mistura influencia negativamente suas propriedades. Entretanto, segundo o método do TRL386 proposto por [6], a porcentagem de agregado recuperado utilizado na mistura reciclada com cimento pode ser de até 100% do revestimento asfáltico, limitando-se apenas à parcela fina da mistura. Já a PCA [7] e o DNIT [8] indicam que a dosagem da mistura reciclada deva conter no máximo 50%, em massa, de material fresado.

Além dos ganhos ambientais, as misturas recicladas têm demonstrado desempenho similar e, em alguns casos, superior ao de misturas cimentadas convencionais, quando se comparam suas propriedades mecânicas [9].

Em resumo, a reciclagem com cimento é uma solução técnica eficiente, com bom desempenho frente às solicitações do tráfego e variações de umidade, e também eficiente no que diz respeito ao emprego de recursos naturais e de energia. Com tais características essa solução contribui para a preservação do meio ambiente e apresenta evidentes vantagens econômicas, pela reutilização de materiais e diminuição de custos com deslocamentos de obra.

3. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

A pesquisa bibliográfica desenvolvida mostrou que os países onde tal tipo de reciclagem tem sido adotada desenvolveram procedimentos próprios para o dimensionamento estrutural de camadas cimentadas. Dos métodos analisados, podem ser destacados os principais aspectos observados em cada um deles:

- **Inglaterra TRL386** [6]: O método utiliza uma série de simplificações, com as variáveis de entrada de capacidade de suporte e tráfego classificadas em categorias, e com a limitação para adoção de soluções com reciclagem para rodovias com volume de tráfego superior a $3,0 \times 10^7$. As espessuras de revestimento asfáltico e base cimentada são obtidas através de ábacos de dimensionamento. Consideram-se valores altos para a resistência à compressão simples de até 10 MPa aos 7 dias.
- **Inglaterra TRL611** [10]: Trata-se de uma revisão do método TRL386, em que a adoção de soluções com reciclagem foi limitada para rodovias com volume de tráfego anual superior a $8,0 \times 10^7$. Consideram-se valores altos para o módulo dinâmico das bases recicladas com cimento, a partir de 5.000 MPa. Uma particularidade é o critério de classificação da mistura, onde são relacionados o módulo dinâmico e a resistência à flexão, classificando o material por zona quanto à sua rigidez e resistência.
- **EUA AASHTO/93** [11]: É um método clássico de dimensionamento empírico. Não é específico para o dimensionamento da reciclagem profunda, porém pode ser adaptado. Os valores de coeficientes

estruturais da camada reciclada com cimento podem ser estimados pela resistência à compressão simples da mistura ou por estudos específicos, com valores que apresentam grande variação, entre 0,13 a 0,30, dificultando a precisão no dimensionamento.

- **EUA CALTRANS** [12]: Apresenta guia próprio para a reciclagem profunda, baseado na equivalência estrutural de camadas e utilização de fatores de equivalência em termos de material granular. O fator adotado para a camada reciclada com cimento é obtido através de uma equação, em função da RCS, onde seu valor oscila entre 1,20 e 1,70. É o único que considera diferença volumétrica entre o material fresado e o material tratado.
- **Espanha Andalucía** [13]: Apresenta adaptação do dimensionamento convencional de estrutura em solo-cimento para a reciclagem com cimento, como também recomendações específicas no dimensionamento e execução da reciclagem. A definição da estrutura final é obtida através da avaliação mecanicista, conforme os modelos preconizados, sem um modelo específico para camada reciclada. São considerados valores fixos de resistência e rigidez para as misturas cimentadas.
- **Espanha Castilla y León** [14]: O método apresenta soluções típicas por meio de um catálogo, em função do tipo de tráfego, e considera fixa a condição de suporte da fundação que receberá a camada reciclada, podendo tal método, dessa forma, acarretar resultados típicos de estruturas superdimensionadas. As espessuras indicadas no catálogo são as mínimas exequíveis, podendo ainda ser incrementadas, justificadas pelo projetista. Considera-se que a camada de reciclagem com cimento apresenta desempenho semelhante à camada de solo-cimento.

São descritas sucintamente no Quadro 1 as principais características observadas nos procedimentos avaliados, com indicação das particularidades dos critérios para a reciclagem com cimento, à exceção do método da AASHTO pelo fato do mesmo não tratar especificamente de bases recicladas.

Quadro 1. Resumo das características observadas nos procedimentos para o dimensionamento de estruturas com reciclagem com cimento

Item	TRL386	TRL611	CALTRANS	Andalucía	Castilla y León
País	Inglaterra	Inglaterra	EUA	Espanha	Espanha
Ano	1999	2004	2012	2007	2004
Espessura mínima BC (cm)	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20
Espessura máxima BC (cm)	0,30	0,47	0,30	0,35	0,35
Espessura CA (cm)	TS a 10	TS a 18	-	TS a 15	5 a 12
CBR do subleito mínimo (%)	2,0	2,0	4,5	6,0	5,0
Tráfego máximo	3,0 x 10 ⁷ 20 anos	8,0 x 10 ⁷ 20 anos	Não há limite 20 anos	Não há limite 20 anos	VDM 800 20 anos
RCS (MPa)	4,5 a 10,0 7 dias	-	2,0 a 4,1 7 dias	Mínimo 2,5 7 dias	2,5 a 4,5 7 dias
RTF (MPa)	-	0,35 a 5,0	-	0,43 e 0,72	-
MR (MPa)	-	5.000 a 60.000 (*)	-	2.000 e 8.000	4.000 a 8.000
Metodologia	Mecanicista	Mecanicista	Semi-empírico	Mecanicista	Mecanicista

Legenda:

BC: base cimentada; CA: concreto asfáltico; RCS: resistência à compressão simples; RTF: resistência à tração na flexão; MR: módulo de resiliência; TS: tratamento superficial.

(*) Método considera o módulo dinâmico.

4. ESTUDO PARAMÉTRICO DE PAVIMENTOS RECICLADOS COM CAMADA CIMENTADA

O objetivo deste item é apresentar os resultados do estudo paramétrico desenvolvido com a finalidade de analisar os principais fatores estruturais que afetam o comportamento dos pavimentos reciclados com camadas cimentadas.

O primeiro estudo (Caso 1) considera a camada cimentada funcionando como camada de base subjacente a um revestimento asfáltico, e o segundo (Caso 2) admitindo que a sub-base seja cimentada e sobre a qual é colocada uma camada de base granular, antes da execução do revestimento final em concreto asfáltico.

Os estudos constaram basicamente da análise das deflexões, tensões e deformações em diversos pontos críticos do pavimento, admitindo-se como carga do eixo simples roda dupla padrão rodoviário nacional de 8,2 tf, com diferentes espessuras e módulos de resiliência dos materiais constituintes da estrutura.

Em função dos resultados obtidos, buscou-se desenvolver critérios de projeto e de verificação estrutural para cada alternativa analisada, contemplando a reciclagem com cimento na camada de base ou sub-base, identificando as vantagens e desvantagens de cada situação.

4.1 Aspectos Metodológicos

Neste trabalho, para determinação dos principais esforços atuantes na estrutura sob efeito da carga de tráfego, empregou-se o *software* computacional Elsym-5, que admite que a estrutura seja um sistema elástico, constituído de até 5 camadas, onde os materiais utilizados são homogêneos, uniformes, isotrópicos e com elasticidade linear.

A carga de tráfego considerada é o semieixo padrão de 8,2 tf, simulada pelo carregamento tipo FWD, com carga (Q) de 40 kN, representado por uma roda simples com raio (r) de 0,15 m, correspondendo a uma pressão de contato (P) de 0,568 MPa.

São apresentados no Quadro 2, os valores adotados neste estudo para cada variável analisada em relação às características geométricas e elásticas de cada camada, envolvendo tipos de estruturas, materiais utilizados, espessuras, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson.

Quadro 2. Valores adotados para estudo paramétrico

Estrutura	Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessuras (m)
Semirígida Caso 1	Revestimento	Concreto Asfáltico	2.250 - 3.000 - 3.750 4.500	0,35	0,05 - 0,10 0,15 - 0,20
	Base	Reciclada com Cimento	2.500 - 5.000 7.500 - 10.000	0,20	0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
	Sub-base	Infraestrutura Remanescente	150 - 225 300 - 375 - 450	0,40	0,10 - 0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
	Subleito	Solo Local	50 - 100 - 150 - 200	0,45	-
Semirígida Invertida Caso 2	Revestimento	Concreto Asfáltico	2.250 - 3.000 - 3.750 4.500	0,35	0,05 - 0,10 0,15 - 0,20
	Base	Brita Graduada Simples	150 - 200 - 400	0,40	0,10 - 0,15 - 0,20
	Sub-Base	Reciclada com Cimento	2.500 - 5.000 7.500 - 10.000	0,20	0,15 - 0,20 0,25 - 0,30
	Subleito	Solo Local	50 - 100 - 150 - 200	0,45	-

Para o material de base do caso 2, adota-se a brita graduada simples, material este sem aditivo e que apresenta módulo de resiliência relativamente baixo, sensivelmente dependente da tensão de confinamento, do teor de umidade e correspondente grau de saturação. Apesar deste material apresentar elasticidade não linear e confinamento entre camadas de elevada rigidez, adotaram-se valores constantes na análise limitados a 400 MPa, a favor da segurança e compatível com os valores aplicados nacionalmente.

4.2 Indicadores estruturais analisados

Neste trabalho procurou-se analisar os valores máximos dos indicadores estruturais a seguir relacionados, nos respectivos pontos de interesse.

- D_0 = Deslocamento vertical ou deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento ($\times 10^{-2}$ mm);
- σ_t = Tensão horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada reciclada com cimento (MPa);
- ϵ_t = Deformação horizontal máxima de tração na fibra inferior da camada asfáltica ($\times 10^{-4}$ cm/cm); e
- ϵ_v = Deformação vertical máxima de compressão no topo do subleito ($\times 10^{-4}$ cm/cm).

Além da deflexão máxima, também procurou-se avaliar outros parâmetros relacionados com a bacia deflectométrica da estrutura, SCI, BDI, BCI e R, que correspondem ao índice de curvatura da superfície, índice de danos à base, índice de curvatura da base e o raio de curvatura, respectivamente, conforme estudado por [15], sendo que os principais destes parâmetros estão abordados nesta pesquisa. No total das simulações foram utilizadas 24.320 estruturas para o Caso 1 e 9.120 para o Caso 2, sendo que destes foram excluídos 1376 casos, por consistirem em resultados inconsistentes.

4.3 Apresentação dos resultados

Os resultados das simulações realizadas foram processados através do *software* Microsoft Excel®, sendo encontradas equações de correlação entre os indicadores estruturais e os demais parâmetros da bacia deflectométrica que caracterizam as condições do pavimento reciclado.

O Quadro 3 apresenta resumidamente os coeficientes dos modelos de regressão e os parâmetros de confiabilidade estatística para os dois casos analisados, de base e sub-base recicladas com cimento. Também procurou-se analisar o valor do coeficiente de determinação R^2 , que qualifica a equação obtida. Os modelos obtidos podem ser representados pelas expressões a seguir (1) e (2), com os respectivos parâmetros e coeficientes indicados.

$$P_{CASO1} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BC}^c \times MR_{BC}^d \times h_{IR}^e \times MR_{IR}^f \times MR_{SL}^g \quad (1)$$

$$P_{CASO2} = 10^k \times h_R^a \times MR_R^b \times h_{BG}^c \times MR_{BG}^d \times h_{SBC}^e \times MR_{SBC}^f \times MR_{SL}^g \quad (2)$$

Quadro 3. Parâmetros e coeficientes do estudo paramétrico

Estrutura	Parâmetro	k	a	b	c	d	e	f	g	R^2
Semirrigida Caso 1	D_0 10^{-2} mm	3,448	-0,175	-0,181	-0,460	-0,173	-0,045	-0,058	-0,597	0,983
	σ_t MPa	-2,297	-0,462	-0,156	-1,093	0,502	-0,084	-0,180	-0,137	0,980
	ϵ_v 10^{-4} cm/cm	1,538	-0,456	-0,211	-1,097	-0,360	-0,311	0,028	-0,419	0,975
	SCI 10^{-2} mm	3,736	-0,002	-0,444	-0,308	-0,318	0,011	-0,006	-0,262	0,734
	BDI 10^{-2} mm	2,014	-0,417	-0,199	-0,961	-0,250	-0,103	-0,133	-0,395	0,966
	BCI 10^{-2} mm	2,088	-0,536	-0,234	-1,236	-0,417	-0,095	-0,140	-0,180	0,962
	D120 10^{-2} mm	2,915	-0,045	-0,028	-0,105	-0,015	-0,026	-0,029	-0,919	0,995
	D60 10^{-2} mm	2,996	-0,153	-0,077	-0,351	-0,078	-0,051	-0,061	-0,776	0,994
	R m	-0,315	-0,050	0,468	0,211	0,296	-0,018	-0,005	0,278	0,726
Semirrigida Invertida Caso 2	D_0 10^{-2} mm	3,622	-0,446	-0,213	0,142	-0,307	-0,270	-0,084	-0,407	0,971
	ϵ_t 10^{-4} cm/cm	-2,569	-0,495	-0,146	-0,384	-0,049	-0,882	0,485	-0,265	0,965
	σ_t MPa	1,694	-0,453	-0,138	-0,341	-0,089	-0,982	-0,453	-0,303	0,970
	ϵ_v 10^{-4} cm/cm	3,361	-0,883	-0,461	0,265	-0,395	-0,082	-0,039	-0,120	0,952
	SCI 10^{-2} mm	3,086	0,004	-0,044	0,341	-0,538	-0,692	-0,226	-0,163	0,798
	BDI 10^{-2} mm	2,093	-0,107	-0,030	-0,121	-0,268	-0,908	-0,252	-0,413	0,917
	BCI 10^{-2} mm	2,866	-0,064	-0,038	-0,052	-0,014	-0,088	-0,019	-0,916	0,996
	D120 10^{-2} mm	2,966	-0,094	-0,041	-0,079	-0,085	-0,326	-0,083	-0,774	0,992
	D60 10^{-2} mm	0,209	0,928	0,499	-0,238	0,368	0,063	0,032	0,119	0,956
R m	3,622	-0,446	-0,213	0,142	-0,307	-0,270	-0,084	-0,407	0,971	

5. CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTO PARA PAVIMENTOS RECICLADOS COM CIMENTO

5.1 Considerações iniciais

Admitindo-se que a reciclagem profunda com cimento de um pavimento existente seja uma alternativa técnica, econômica e sustentável de reabilitação, é necessário que a estrutura final proposta atenda aos critérios de dimensionamento preconizados pelo órgão para pavimentos novos.

No caso do DER/SP e DNIT, o método de dimensionamento estrutural de pavimentos asfálticos baseia-se em curvas que fornecem as espessuras totais da estrutura, em função da condição de suporte do subleito existente, através do parâmetro de CBR, e das características do tráfego a que o pavimento estará submetido. No decorrer dos anos tem sido verificado que esses métodos adotados visam exclusivamente à proteção do subleito e demais camadas contra excessivos esforços de cisalhamento surgidos mediante a passagem do tráfego, sendo o CBR uma tentativa de quantificação da resistência ao cisalhamento do material.

Constatando que os métodos não levam em conta de maneira explícita as características de resiliência ou de deformabilidade elástica das camadas do pavimento, o presente trabalho apresenta um procedimento de avaliação estrutural que considera complementarmente a questão da resistência dos materiais à fadiga.

5.2 Esforços atuantes

Os cálculos das tensões, deformações e deslocamentos atuantes foram feitos pelo *software* computacional Elsym-5, conforme abordado no estudo paramétrico. Os resultados da simulação computacional, que permitem analisar as diversas estruturas de pavimentos estudados, variando-se as espessuras das camadas, o MR dos materiais envolvidos e diferentes tipos de fundação, estão apresentados no item 4.3.

5.3 Esforços resistentes

Considerando que existem grandes variações entre as diversas expressões que traduzem as relações de fadiga entre o número de solicitações do eixo padrão (N) e os diferentes indicadores estruturais, foram selecionados modelos de amplo uso nacional para estimar a vida de fadiga dos materiais envolvidos na avaliação estrutural. No caso específico do estudo à fadiga da camada cimentada (σ_t), pela carência de modelos nacionais para misturas recicladas com cimento, adotou-se o modelo proposto por [3]. Para os demais parâmetros estudados, D_0 , ϵ_t e ϵ_v , foram utilizados os modelos preconizados pelo DER/SP [16], DNER PRO-11 (1979), FHWA (1976) e Dormon e Metcalf (1965), respectivamente.

5.4 Dimensionamento

O critério de projeto proposto consiste em determinar a estrutura reciclada como se fosse um pavimento novo, considerando o tráfego futuro atuante e o subleito constituído pela infraestrutura remanescente, cujo CBR deve ser estimado a partir dos dados deflectométricos previamente ao serviço de reciclagem. De acordo com o DNIT [17], a espessura total necessária do pavimento (H_t), para a proteção do subleito quanto às tensões de cisalhamento excessivas é expressa em termos de material granular e definida por um ábaco de dimensionamento ou modelo.

Ainda, conforme o procedimento do DNIT, a espessura mínima do revestimento asfáltico é pré-fixada em função do número N de solicitações do eixo padrão rodoviário. Uma vez definida a espessura do revestimento asfáltico são adotados os coeficientes de equivalência estrutural, podendo os mesmos variar de acordo com o material empregado, determinando a espessura mínima necessária de acordo com as inequações previstas. Em resumo, para a obtenção da espessura da camada reciclada, obtém-se pelo método do DNIT a seguinte expressão (3):

$$B_{Rec} = \frac{0,7767 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} - R \times K_R - SB \times K_{SB}}{K_{BRec}} \quad (3)$$

Onde:

R = Espessura mínima de revestimento asfáltico (m);

K_R = Coeficiente estrutural do revestimento asfáltico;

B_{Rec} = Espessura da base reciclada necessária (m);

K_{BRec} = Coeficiente estrutural da base reciclada;

SB = Espessura da infraestrutura remanescente (m);

K_{SB} = Coeficiente estrutural infraestrutura remanescente;

H_t = Espessura total necessária em termos de material granular (m);

CBR = CBR do subleito (%); e

N_{USACE} = Número de solicitações do eixo padrão.

Uma vez definida a estrutura constituída de revestimento asfáltico denso e base da camada reciclada com cimento, recomenda-se a verificação quanto à fadiga dos materiais através da análise mecanicista. Os pontos e parâmetros críticos de análise dos esforços atuantes são: D_0 , ϵ_t , σ_t e ϵ_p ; os esforços resistentes são caracterizados pelos modelos de fadiga indicados no item 5.3. Do confronto entre os modelos de esforços atuantes, apresentados no Quadro 3, e esforços resistentes, obtêm-se os modelos de avaliação estrutural para determinação da espessura mínima da camada reciclada com cimento.

A partir do conhecimento obtido, tanto por meio da experiência internacional como pelo estudo paramétrico desenvolvido, propõe-se que as etapas do dimensionamento estrutural de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento sejam realizadas de forma iterativa e conforme a sequência ilustrada no fluxograma da Figura 1. Com tal procedimento pode-se chegar à definição se a solução de reciclagem é viável e adequada ou se é recomendado considerar alternativas como estratégia de reabilitação ou a reconstrução total do pavimento.

6. AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS ESTUDADOS

Com a finalidade de se aferir de maneira prática os métodos analisados e se obter uma análise de sensibilidade é realizado o estudo do dimensionamento estrutural da reciclagem profunda, através dos diferentes procedimentos analisados, para a reabilitação de um pavimento asfáltico. No Quadro 4, são apresentadas as premissas adotadas para o dimensionamento estrutural.

Quadro 4: Resumo dos principais dados para o dimensionamento

$N_{USACE} = 2,0 \times 10^7$ e $N_{AASHTO} = 5,0 \times 10^6$	Rigidez e resistência da camada reciclada:	RCS 7 dias = 3,5 MPa
Espessura Pav. Existente = 0,65 m		RTF 28 dias = 0,6 MPa
MR infraestrutura remanescente = 130 MPa		MR = 5.000 MPa
CBR Subleito = 6%		$K_{BRec} = 1,40$

Apresenta-se no Quadro 5 o resumo das estruturas dimensionadas conforme os procedimentos investigados.

Quadro 5: Resumo do dimensionamento estrutural

Procedimento	Espessura (m)				
	Revestimento asfáltico	Base granular	Reciclagem com cimento	Infraestrutura remanescente	
TRL386	0,150	-	0,240	0,260	
TRL611	0,150	-	0,420	0,080	
AASHTO	0,075	-	0,200	0,375	
CALTRANS	0,150	-	0,270	0,380	
Andalucía	0,150	-	0,250	0,250	
Castilla y León	0,180	-	0,350	0,120	
Critério proposto	Semirrígido	0,100	-	0,270	0,280
	Invertido	0,100	0,120	0,210	0,220

Conforme observado, as espessuras para a camada de revestimento asfáltico variam entre 0,075 m e 0,180 m, respeitando a espessura mínima prevista para cada procedimento, exceção para o critério de Castilla y León, onde foi necessário o incremento no revestimento asfáltico para atendimento dos modelos previstos pelo método. Ressalta-se que o catálogo de soluções proposto no procedimento é baseado sobre uma fundação classificada com $MR \geq 120$ MPa, o que justifica a necessidade de incremento no revestimento asfáltico devido ao fato do CBR de projeto adotado ser igual a 6%.

Os procedimentos da AASHTO e do DNIT preconizam as menores espessuras de revestimento asfáltico obtidas, 0,075 m e 0,100 m, respectivamente, quando comparadas a outros métodos investigados que apresentam soluções de revestimento asfáltico partindo de 0,150 m para o tráfego previsto.

Quanto às espessuras obtidas para a camada reciclada, há grande variação nos valores obtidos, oscilando entre 0,200 m e 0,420 m. O dimensionamento da camada mais espessa é obtido pelo método inglês TRL611, podendo tal resultado ser justificado pelo conceito de dimensionamento estrutural baseado na correlação entre o módulo dinâmico e a resistência à tração na flexão, limitando tais parâmetros a valores aproximados de 60.000 MPa e 5,0 MPa, respectivamente, valores extremamente altos para os padrões rodoviários no Brasil.

O procedimento adaptado da AASHTO e o método proposto para estrutura semirrígida invertida apresentam as menores espessuras para a camada reciclada, com resultado entre o mínimo recomendado de 0,200 m e 0,210 m. Entretanto, a estrutura semirrígida invertida obtida apresenta espessura total resultante para as novas camadas implantadas de 0,430 m, superior ao obtido pela AASHTO de 0,275 m.

Os métodos do TRL386, CALTRANS, Andalucía e o critério proposto para estrutura semirrígida apresentam espessuras semelhantes e plenamente executáveis, variando entre 0,240 m e 0,270 m.

7. CONCLUSÕES

Pela análise bibliográfica desenvolvida verificou-se que em alguns países foram desenvolvidos métodos de dimensionamento estrutural específicos para as soluções de reabilitação em reciclagem profunda com cimento Portland. Embora esta tecnologia esteja relativamente consolidada no Brasil, o dimensionamento estrutural deste tipo de solução tem sido efetuado de maneira empírica, à luz de informações e experiências divulgadas principalmente pelas empresas que comercializam o equipamento, ou por outras que executam especificamente este tipo de serviço.

Uma vez definida a utilização da técnica de reciclagem, o procedimento proposto consiste em dimensionar o pavimento como se fosse uma nova estrutura apoiada sobre o remanescente resultante da fresagem profunda, atendendo aos critérios do DNIT para pavimentos asfálticos semirrígidos e invertidos. Tal procedimento deve ser complementado pela avaliação mecanicista, levando em consideração a teoria elástica linear e a resistência à fadiga dos materiais constituintes das diversas camadas envolvidas, fundamentada pelo estudo paramétrico de equações para correlação entre as deformações críticas esperadas na estrutura reciclada, resultando em modelos de dimensionamento para a camada reciclada com cimento.

A análise paramétrica permitiu observar que o parâmetro de tensão de tração (σ_t) é crítico no dimensionamento da camada reciclada com cimento para a estrutura semirrígida. Nos casos de estrutura semirrígida invertida, o parâmetro de tensão de tração (σ_t) também apresenta grande influência, porém, em determinados, casos a deformação horizontal de tração (ϵ_t) se mostra como parâmetro crítico, com grande influência exercida pela camada de revestimento asfáltico e base granular, requerendo critério rigoroso do projetista na definição das espessuras adotadas.

Como se observou na avaliação dos métodos, após aplicação dos critérios recomendados neste trabalho, as espessuras obtidas no dimensionamento estrutural da camada reciclada apresentaram-se coerentes com os procedimentos estudados, exceção para o método inglês do TRL611 e o espanhol de Castilla y León.

O emprego do modelo de fadiga para camada reciclada com cimento proposto por [3], adotado neste estudo pela carência de modelos nacionais específicos, apresentou resultados satisfatórios quando comparado aos modelos nacionais existentes para outros tipos de misturas tratadas com cimento, atuando em uma faixa de desempenho consistente, resultando em espessuras coerentes para a camada reciclada entre 20 cm e 30 cm.

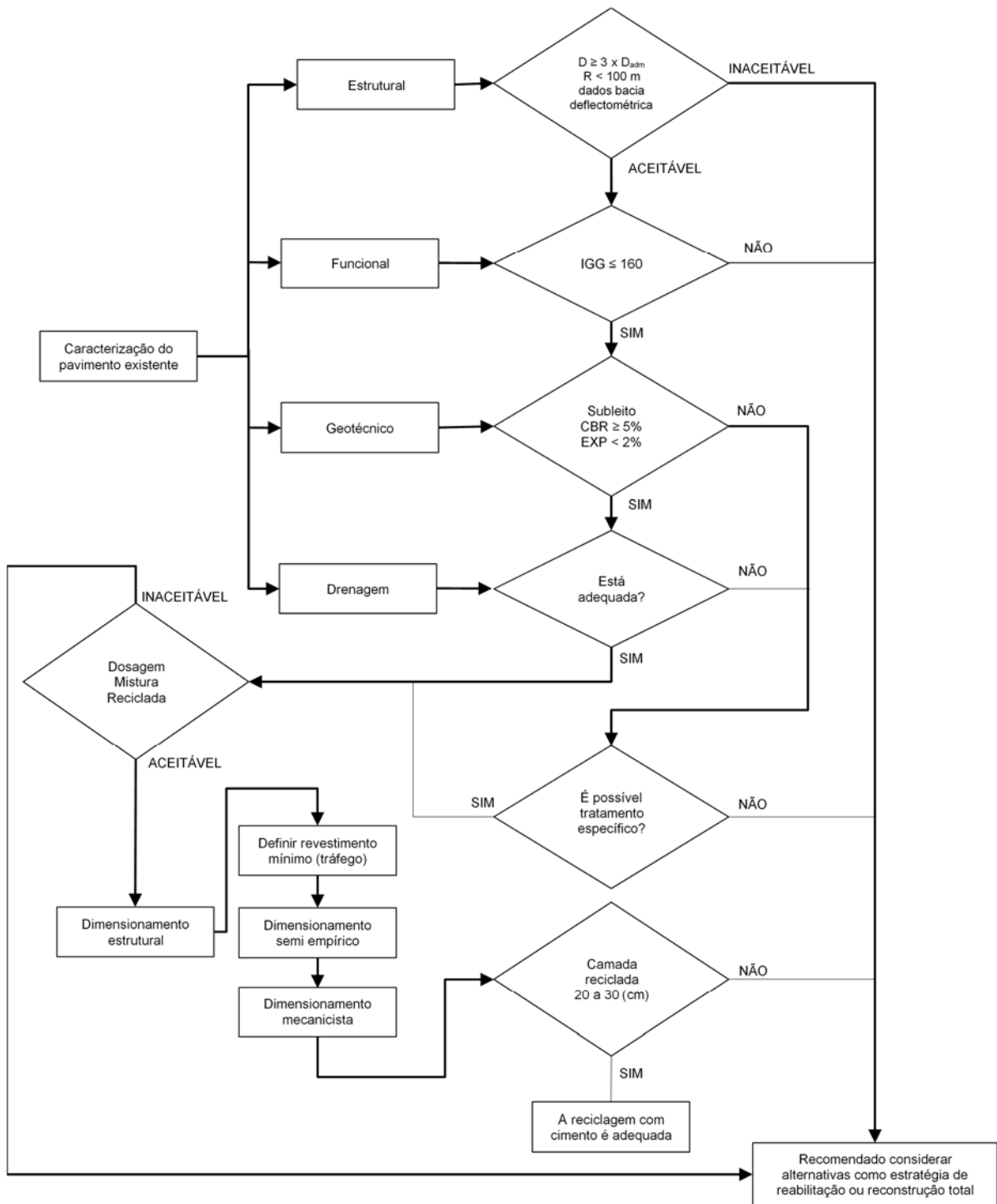


Fig.1. Fluxograma para dimensionamento de pavimento com reciclagem profunda e adição de cimento

8. AGRADECIMENTOS

À Planservi Engenharia, à Escola Politécnica da USP e ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo incentivo e parceria na realização deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- 1 V. Bonfim, Fresagem de pavimentos asfálticos. 3ª edição. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- 2 P. C. A. D. Oliveira, Diretrizes para projetos de reciclagem com adição de brita e cimento. Campinas: Tecnopav Engenharia, 2011.
- 3 J. D. Minguela, El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento. Burgos: Tese (Doutorado) - Universidad de Burgos, 2011.
- 4 L. M. A. Dellabianca, Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos. Brasília: Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2004.
- 5 W. Fedrigo, Reciclagem de pavimentos com adição de cimento portland: definição das bases para um método de dosagem. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- 6 L. J. Milton; M. Earland, Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. Crowthorne: Transportation Research Laboratory Report 386, 1999.
- 7 Portland Cement Association. Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement. Illinois, 2005.
- 8 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço: DNIT 167/2013-ES. Rio de Janeiro, 2013.
- 9 T. Lima, Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente. Fortaleza: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, 2003.
- 10 D. Merrill; M. Nunn; I. Carswell, A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements. Transportation Research Laboratory Report 611. Crowthorne. 2004.
- 11 American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for design of pavements structures. Washington D.C., 1993.
- 12 California Department of Transportation. Full depth reclamation using cement. California, 2013.
- 13 Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Sevilla, 2007.
- 14 Junta de Castilla y León. Consejería de Formento. Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos. Salamanca, 2004.
- 15 F. M. Lopes, Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação. Campinas: Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- 16 Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Projeto de pavimentação: IP-DE-P00/001. São Paulo, 2006.
- 17 Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de pavimentação: Publicação IPR-719. Rio de Janeiro, 2006.