

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

DIMENSIONAMENTO DE CAMADA DE FATC COM VARIADOS MODELOS DE CAMADAS ESTABILIZADAS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Caio M. Raul¹; Sergio T. Oshima¹; Thamiris Oliveira¹; Felipe F. Camargo¹; André F. Vale¹,
Raphael F. Daibert² & Cláudio C. Dias²*

RESUMO

A técnica de construção ou reabilitação de pavimentos com utilização de camadas de base/sub-base de material fresado (RAP) com adição de agregado e cimento (FATC) já vem sendo bastante difundida e aplicada em diversos projetos nacionais. Apesar da sua ampla utilização, não existem, atualmente, modelos de desempenho específicos para a avaliação de fadiga para o FATC. Para contornar esta questão, frequentemente, são adotados modelos desenvolvidos para materiais cimentícios semelhantes, não havendo um consenso sobre qual análise deve ser considerada. O presente estudo abrangeu a revisão do estado da arte e da prática dos modelos atualmente empregadas para o dimensionamento de pavimentos com camadas em FATC com objetivo de comparar a aplicação de distintos modelos consagrados para outros tipos de materiais com características semelhantes ao FATC, avaliando-se a sensibilidade do emprego desses modelos no dimensionamento de pavimentos com o material fresado quimicamente estabilizado. Foram realizados diversos dimensionamentos variando-se apenas a espessura de base em FATC e analisando essa camada com diversos modelos para realizar uma análise de sensibilidade. Os dimensionamentos foram realizados para uma estrutura padrão, com três níveis de tráfego e três níveis de capacidade de suporte do subleito. Verificou-se nessa análise de sensibilidade que as espessuras de FATC variaram consideravelmente a depender do modelo de fadiga utilizado para análise de tensões. Os resultados encontrados tornaram evidente a necessidade de desenvolvimento de um modelo específico para previsão de desempenho para camadas de FATC.

PALAVRAS-CHAVE: reciclagem a frio, RAP, modelo de desempenho, FATC, dimensionamento de pavimento

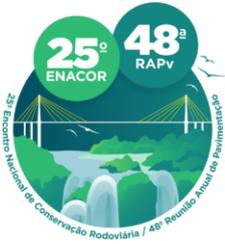
ABSTRACT

The construction or rehabilitation of pavements using base/sub-base layers using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) with the addition of crushed stone and cement (FATC) has been highly disseminated and applied in several national projects. Despite its widespread use, currently, there are no specific performance models for estimating the fatigue performance for FATC materials. To overcome this issue, models developed for other types of cementitious materials are often adopted, with no consensus on which analysis to be considered. The present study consisted of a literature review of the state of the art and practice regarding the performance models used for designing pavements using FATC, with the goal of comparing the application of different consecrated models for other types of materials with similar characteristics, evaluating the sensitivity of the use of these models in the design of chemically stabilized milled material. Several pavement designs were carried out varying the FATC thicknesses and the fatigue models in order to conduct a sensibility analysis. The designs were calculated for a standard structure for three levels of traffic and three levels of subgrade bearing capacity. It was found that the FATC thicknesses varied considerably depending on the fatigue model used to evaluate the stresses. The results highlighted the need for developing a specific model for predicting the performance of FATC layers.

KEY WORDS: cold recycling, RAP, performance model, FATC, pavement structural design

¹ RoadRunner, caio.raul@rrunner.com.br; sergio.oshima@rrunner.com.br; thamiris.oliveira@rrunner.com.br; felipe.camargo@rrunner.com.br; andre.vale@rrunner.com.br

² Ecorodovias, raphael.daibert@ecorodovias.com.br; claudio.dias@ecorodovias.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o descarte dos resíduos oriundos da atividade humana, bem como a racionalidade nas ações na engenharia, tem tornado a busca por novos materiais e técnicas construtivas uma opção cada vez mais atraente. Assim como o aço, alumínio, vidro, plástico, entre outros, o concreto asfáltico (CA) também é um material com grande aplicabilidade na reciclagem de pavimentos. Quando o concreto asfáltico degradado é fresado, ele passa a ser denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP).

Na busca por alternativas mais sustentáveis para a pavimentação rodoviária, uma das soluções utilizadas atualmente é o uso do material fresado com adição de agregado e cimento (FATC) para compor as camadas de base e sub-base na restauração ou construção de pavimentos. A produção desse material consiste na retirada do asfalto existente por meio da fresagem do revestimento de pavimentos deteriorados e posterior adição de agregados e cimento, em dosagem específica, resultando em uma mistura quimicamente estabilizada e com propriedades satisfatórias para aplicação em camadas de base de pavimentos novos.

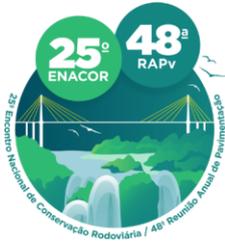
Esse processo permite a reutilização de materiais descartados que já foram utilizados na cadeia produtiva; diminuindo os custos inerentes à aquisição de matérias primas virgens e aproveitando materiais que poderiam se tornar passivos ambientais. Neste ponto, observa-se que, além de fatores de ordem ambientais e econômicos, é essencial que essa alternativa também seja pautada no aspecto técnico. A execução de estruturas de pavimento utilizando camadas de base em FATC já vem sendo difundida em vários projetos no Brasil, todavia, ainda não há normas específicas para a previsão de desempenho desse material no dimensionamento de pavimentos, sendo necessário recorrer à aplicação de outros métodos desenvolvidos para materiais estabilizados com cimento e de semelhante concepção, tais como brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento (SC), concreto compactado a rolo (CCR) e reciclagens de revestimento e base com adição de cimento.

A carência de modelos de desempenhos compatíveis com este tipo de material e seu crescente emprego em obras de restauração de rodovias leva a necessidade de estudos de modelos que se mostrem aplicáveis em estudos e projetos desta natureza. Assim este estudo busca comparar a aplicação de distintos modelos consagrados para outros tipos de materiais com características semelhantes ao FATC, avaliando-se a sensibilidade do emprego desses modelos no dimensionamento de pavimentos com o material fresado quimicamente estabilizado.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A necessidade de modelos específicos para materiais empregados em camadas asfálticas, em especial com agregados reciclados, tem sido amplamente pesquisada. Fedrigo, Núñez e Visser (2020) apresentam uma revisão das pesquisas sobre a reciclagem profunda com cimento no mundo, abordando cronologicamente as experiências sobre o tema, as vantagens e desvantagens do método, os projetos das misturas e o comportamento dos materiais em laboratório. Paralelamente, apresentam comparações entre as experiências desenvolvidas no Brasil e no exterior, além de analisar variados métodos de dimensionamento de misturas estabilizadas com cimento. Verificou-se que, apesar de algumas semelhanças, cada método possui uma abordagem própria que pode impactar no resultado final.

Lima (2018) analisou diversos métodos de dimensionamento de pavimentos com camada cimentada disponíveis na literatura e propôs uma metodologia para o dimensionamento estrutural de pavimentos reciclados à frio com cimento, pautado nas premissas preconizadas pelos órgãos públicos nacionais. Em comum, os autores citados concordam que, apesar do crescente interesse pelo tema, ainda não há



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



um método consolidado para o dimensionamento estrutural de camadas recicladas estabilizada com cimento, sendo muitas vezes necessário promover adaptações.

No que diz respeito à incorporação do material fresado, Specht *et al.* (2013) avaliaram em laboratório a possibilidade da utilização desse material como camada de base e sub-base de pavimento. Nesse estudo, o fresado foi mecânica, granulométrica e quimicamente estabilizado e ensaiado com posterior comparação com valores encontrados nas normas vigentes, onde foi verificada a capacidade de substituir os materiais tradicionais nas diversas camadas do pavimento asfáltico.

Ainda, sobre a utilização de fresado, Fedrigo e Núñez (2021) apresentam um estudo experimental e analítico onde as misturas recicladas compostas por RAP, agregado e cimento foram caracterizadas em laboratório, nos quais foram determinados os módulos de resiliência e, posteriormente, inseridos no programa MeDiNa, a fim de se comparar os resultados obtidos com resultados encontrados na literatura, obtendo como resultado a superioridade do desempenho à fadiga das camadas recicladas com maiores teores de cimento e fresado.

Devido a presença de material fresado, as misturas de FATC podem apresentar um comportamento diferente de outros materiais estabilizados com cimento. Conforme verificado, atualmente, não existem modelos desenvolvidos especificamente para a determinação da fadiga da camada de FATC, sendo necessário utilizar modelos desenvolvidos para outros tipos de materiais. Algumas das metodologias mais comumente adaptadas para utilização do FATC são com base em modelos historicamente consagrados – e utilizados em normativas nacionais – para dimensionando de outros tipos de materiais estabilizados com cimento, tais como BGTC, SC e CCR. Uma alternativa utilizada é o dimensionamento a partir de modelos de camadas estabilizada de manuais internacionais, como é o caso do manual de pavimentação da Austrália (2017). Por fim, outra opção de modelos são os já desenvolvidos em laboratório para materiais reciclados com cimento, porém ainda sem a determinação de fatores campo-laboratório.

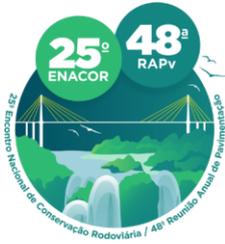
A utilização de BGTC como material para compor a base de pavimentos é uma técnica consolidada na pavimentação rodoviária em projetos de pavimentos rígidos e semirrígidos e já foi objeto de diversos estudos no Brasil e no mundo. No Brasil, Balbo (1993) conduziu em sua pesquisa diversos ensaios de fadiga em laboratório para avaliar pavimentos com BGTC. Nesse estudo, o número de passagens do eixo rodoviário padrão (N) é obtido a partir da razão entre a tensão de tração na base da camada cimentada e tensão resistente de tração a flexão, conforme equação 1, apresentada a seguir, onde SR representa a relação entre as tensões de tração atuante e de ruptura.

$$N = 10^{17,137 - 19,608 SR} \quad (1)$$

Em estudo analisando a fadiga, fratura e tenacidade das camadas de BGTC, Balbo (2006) verificou que em comparação com concretos, as camadas de BGTC possuem elevada fragilidade e baixíssima tenacidade, mesmo quando dosada em condições ótimas. Para prevenir a deterioração da camada cimentada, conclui-se que a relação entre a tensão de tração atuante na base da camada cimentada e a tensão resistente de tração do material deve ser limitada à 50%.

Para o caso de pavimentos compostos com solo cimento, Ceratti (1991) propôs um modelo para a ruptura por fadiga. Nesse estudo, a vida útil do pavimento depende da tensão de tração aplicada na base da camada cimentada, além do tipo de solo utilizado na mistura, definidos de acordo com a classificação MCT e representado pelos coeficientes A e B na equação 2 e Tabela 1.

$$N = 10^{\left(\frac{SR-A}{B}\right)} \quad (2)$$



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 1. Tipo de solo – Classificação MCT (CERATTI, 1991)

Tipo de Solo	A	B
Areias não lateríticas (NA)	125,63	-14,920
Areias lateríticas (LA)	89,86	-3,930
Solos arenosos lateríticos (LA')	94,76	-2,500
Solos argilosos lateríticos (LG')	64,01	-0,822

Já os concretos compactados a rolo, que são tipicamente empregados na base de pavimentos rígidos e semirrígidos, possuem uma mistura com processo construtivo semelhante ao de bases tratadas com cimento. Trichês (1994) executou ensaios com esse material na elaboração de sua tese para determinar seu comportamento na fadiga, em função no tráfego no pavimento e a resistência a tração do material. O modelo de fadiga, para consumo de cimento de 120 kg/m³ é apresentado na equação 3.

$$N = 10^{14,911 - 15,074.SR} \quad (3)$$

O Manual da Austrália (AUSTROADS PAVEMENT DESIGN GUIDE, 2017) traz uma revisão sobre o uso de materiais cimentados nas camadas de pavimentos e dispõe da deformação horizontal na base da camada cimentada para determinar o tráfego para ruptura da estrutura por fadiga. A vida de fadiga pode ser determinada por ensaios de laboratório com aplicação de fatores laboratório campo ou através de módulos e tensões resistentes assumidos, consolidados em uma constante K, que leva em consideração a proporção de cimento na mistura, e valores típicos desses parâmetros. A equação 4 expressa a determinação do número de repetições admissíveis em função do valor de K.

$$N = \left(\frac{K}{\mu\varepsilon}\right)^{12} \quad (4)$$

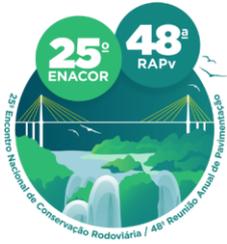
Por fim, analisando-se exemplos de modelos desenvolvidos para camadas de reciclagem com cimento, Minguela (2011) estudou em sua tese o comportamento de pavimentos reciclados com cimento em laboratório. A equação 5 apresenta uma das equações de fadiga encontradas em seu estudo.

$$\sigma = R_f \cdot 0,64 \cdot \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-0,035} \quad (5)$$

Dos modelos apresentados acima, a limitação da resistência à tração em 50% da tensão resistente de tração do FATC é o critério que vem sendo mais utilizado no dimensionamento de estruturas com FATC.

OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O presente estudo buscou avaliar o impacto dos diferentes modelos disponíveis para o dimensionamento de camadas estabilizadas com cimento nas espessuras de FATC, para diferentes níveis de tráfego e capacidade de suporte do subleito, representados pelo número acumulado de passagens do eixo padrão (N) e condições de suporte do solo de fundação. Atualmente, não existem



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



modelos desenvolvidos especificamente para a determinação da vida de fadiga da camada de fresado com adição de agregado e cimento.

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo realizar verificar a sensibilidade dos modelos de desempenho tipicamente empregados no dimensionamento de estruturas de pavimentos com camadas cimentadas e verificar seu impacto nas espessuras de FATC quando utilizada como uma camada de base de pavimento. A título de comparação, considerou-se o dimensionamento da mesma estrutura a partir do método do DNIT, assumindo-se um coeficiente de equivalência estrutural de $K=1,4$, semelhante à de um solo-cimento.

Vale ressaltar que a maioria dos modelos utilizados no presente estudo não foram desenvolvidos para a aplicação em materiais com agregados reciclados, como é o caso do FATC, todavia, estão utilizados na análise de sensibilidade em questão.

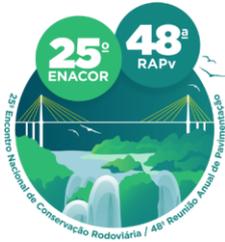
METODOLOGIA

A abordagem do presente estudo consiste na verificação das tensões, deformações e deslocamentos atuantes, por meio de análise mecanicista, em uma camada de base composta por FATC, com os limites aceitáveis calculados por variados modelos de vida de fadiga de camadas estabilizadas com cimento. A estrutura modelada para as análises é composta por uma camada de revestimento em concreto asfáltico modificado com borracha (CA), uma camada de base composta de fresado com adição de agregado e cimento (FATC), a qual variou-se a espessura e é objeto do presente estudo e uma camada de sub-base de um material granular com espessura fixada em 20 cm sobre o subleito. Para a verificação dos esforços mecanísticos nas camadas do pavimento e dimensionamento das alternativas de pavimentos em tela, fazem-se necessárias considerações referentes aos módulos resilientes e coeficientes de Poisson de cada um dos materiais de pavimentação que irão compor a estrutura de pavimento. Para a definição dos módulos de resiliência foram utilizados os valores de referência da literatura ou recomendações de normativas nacionais.

Para a camada de sub-base, considerou-se um módulo correspondente a um material granular de 2.500 kgf/cm^2 , que é aproximadamente o meio da banda sugerida para uma camada de brita graduada na IP-DE-P00/001 do DER/SP (2006). No caso da camada de revestimento em concreto asfáltico modificado com borracha (CA), não há uma sugestão de módulos de resiliência em órgãos oficiais. Nesse caso, fez-se uma busca na literatura, onde se verificou uma variação de resultados entre 25.000 e 80.000 kgf/cm^2 (SALINI, 2000; CEZARO JUNIOR, 2008; NETTO E REIS, 2015). Como a maioria dos resultados observados tendem a variar entre 25.000 e 35.000 kgf/cm^2 , optou-se por utilizar um módulo de resiliência de 35.000 kgf/cm^2 para o asfalto borracha.

Para a determinação do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral da camada de FATC, foram considerados como base os resultados apresentados por Rosa, Lorenzo e Pacheco (2007). Considerou-se como referência os valores encontrados na amostra 03 (65% Material Fresado + 10% Brita 1 + 10% Pedrisco + 10% Pó de Pedra + 5% de cimento Portland CP II E32) com módulo de resiliência variando entre 35.000 e 40.000 kgf/cm^2 e resistência à tração indireta por compressão diametral de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$. Para efeito de análise, no presente estudo considerou-se um módulo de 35.000 kgf/cm^2 – valor fixado no estudo visto que o objetivo é verificar-se a comparação dos modelos na definição do comportamento da estrutura de pavimento.

Por fim, para os coeficientes de Poisson, foram utilizados os valores recomendados na instrução de projeto IP-DE-P00/001 do DER/SP (2006). Vale salientar que o objetivo do presente estudo não é analisar a influência do módulo, Poisson ou composição das camadas do pavimento, mas sim a



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



variação e sensibilidade do dimensionamento mecânico por meio de variados modelos de misturas estabilizadas com cimento.

Ainda, com o objetivo de analisar o papel da capacidade de suporte no comportamento das estruturas analisadas foram estudadas 3 condições diferentes de subleito, representadas por módulos de resiliência de 600, 1.000 e 1.500 kgf/cm².

Os valores de módulo de resiliência, espessuras e coeficiente de Poisson analisados estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros Análise Mecânica

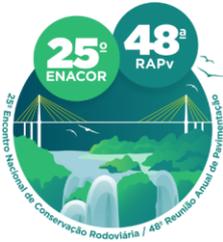
Parâmetro	CA	FATC	Sub-base	Subleito
Espessura (cm)	7 - 9	15 - 50	20	-
Coefficiente de Poisson (ν)	0,30	0,30	0,40	0,40
Módulo de Resiliência (kgf/cm ²)	35.000	35.000	2.500	600 1.000 1.500

Além dessas considerações, o presente estudo se propôs a avaliar três níveis de tráfego diferentes, sendo estes caracterizados por passagens equivalente do eixo padrão (número N) tanto pela metodologia USACE, como pela metodologia AASHTO. Para efeito de análise no presente estudo considerou-se que o N_{AASHTO} equivale a um terço do N_{USACE} . Na sequência estão apresentados os níveis de tráfego considerados.

- Nível de Tráfego [1]
 - $N_{USACE} = 2,00 \times 10^7$
 - $N_{AASHTO} = 6,67 \times 10^6$
- Nível de Tráfego [2]
 - $N_{USACE} = 5,00 \times 10^7$
 - $N_{AASHTO} = 1,67 \times 10^7$
- Nível de Tráfego [3]
 - $N_{USACE} = 1,00 \times 10^8$
 - $N_{AASHTO} = 3,33 \times 10^7$

Observa-se que para os níveis de tráfego [1] e [2] considerou-se uma espessura fixa de revestimento de 7 cm, sendo que para o nível de tráfego [3], considerou-se uma espessura fixa de revestimento de 9 cm. Apesar da camada de revestimento estar trabalhando sobre compressão nas estruturas dimensionadas, estes valores foram selecionados para atender as espessuras mínimas de revestimento pelo método de dimensionamento de pavimentos do DNIT (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, IPR – 719, 2006) (10 cm para os níveis de tráfego [1] e [2] e 12,5 cm para o nível de tráfego [3]) com a consideração da aplicação do fator redutor de espessura de 0,70 pelo emprego do asfalto borracha previsto na instrução de projeto IP.DIN/009 (2013) da Artesp. O objetivo de se fixar as espessuras de revestimento foi justamente analisar a sensibilidade dos modelos quanto a espessura de FATC.

Conforme já mencionado anteriormente, os modelos utilizados no presente estudo em geral não foram desenvolvidos para a aplicação em materiais com agregados reciclados, como é o caso do FATC, todavia o que está sendo analisado é a sensibilidade da aplicação destes para este material, visto que não há um modelo específico. Desta forma, são necessárias algumas reservas a respeito dos modelos



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



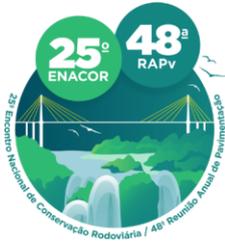
e parâmetros adotados de forma a adequar os modelos para o uso do FATC. Salienta-se também que alguns parâmetros foram adotados/simplificados de forma a se obter uma estrutura a título de comparação com os demais. A tabela 3 apresenta os modelos considerados na análise do presente estudo, assim como algumas considerações.

Tabela 3: Modelo Considerados

Modelo	Material	Metodologia N	Observações
Método DNIT (2006)	-	USACE	- Coeficiente estrutural FATC (K) = 1,4 - Assumindo-se valores de CBR de 6%, 10% e 15% para os distintos subleitos considerados na análise
Balbo (1993)	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	USACE	- Não considerado fator laboratório-campo
50% Resistência a Tração	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	-	-
Minguela (2011)	Reciclagem com Cimento	AASHTO	- Não considerado fator laboratório-campo
Austroads Pavement Design Guide (2017)	Estabilizado com Cimento	AASHTO	- Análise com módulos estimados - K=247 obtido por interpolação
Ceratti (1991)	Solo Cimento (SC)	USACE	- Fatores para solos LA' (A=94,76 e B=-2,50)
Trichês (1993)	Concreto Compactado com Rolo (CCR)	USACE	- Fatores para consumo de 120 kg/m ³ de cimento

A verificação mecânica foi concebida de forma a se determinar diversos indicadores estruturais representados pelas deformações verticais reversíveis (deflexões) na superfície (D), tensão de tração horizontal na camada cimentada (σ_t) e pela deformação vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_c). A análise de comportamento das estruturas foi feita através da verificação da compatibilidade entre esforços solicitantes (devidos à aplicação de cargas) e os esforços resistentes, intrínsecos de cada material, traduzidos pelas equações de fadiga. Nesta tarefa, fez-se uso do programa *Elastic Layered System (Elsym5)*, o qual permite a partir das espessuras das camadas do pavimento, suas propriedades resilientes e da definição dos carregamentos impostos, determinar o deslocamento, tensões e deformações ao longo de toda a infraestrutura.

O carregamento considerado no presente estudo foi composto por 4 rodas com cargas de 2.050 kgf e 5,60 kgf/cm² de pressão cada, posicionadas na [1] origem (0;0), [2] afastada 28,8 cm (28,8;0) da origem, [3] afastada 176,1 cm (176,1;0) da origem e [4] afastada 204,9 cm (204,9;0) da origem. Os deslocamentos, tensões e deformações foram verificados em 5 pontos no plano horizontal de forma a se obter o valor crítico de cada parâmetro: [1] a 14,4 cm da origem (14,4;0), [2] a 16,2 cm da origem (16,2;0), [3] a 18,0 cm da origem (18,0;0), [4] a 23,4 cm da origem (23,4;0) e [5] a 28,8 cm da origem (28,8;0). A Figura 1 ilustra a posição dos carregamentos, pontos de análise e parâmetros considerados no presente estudo.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

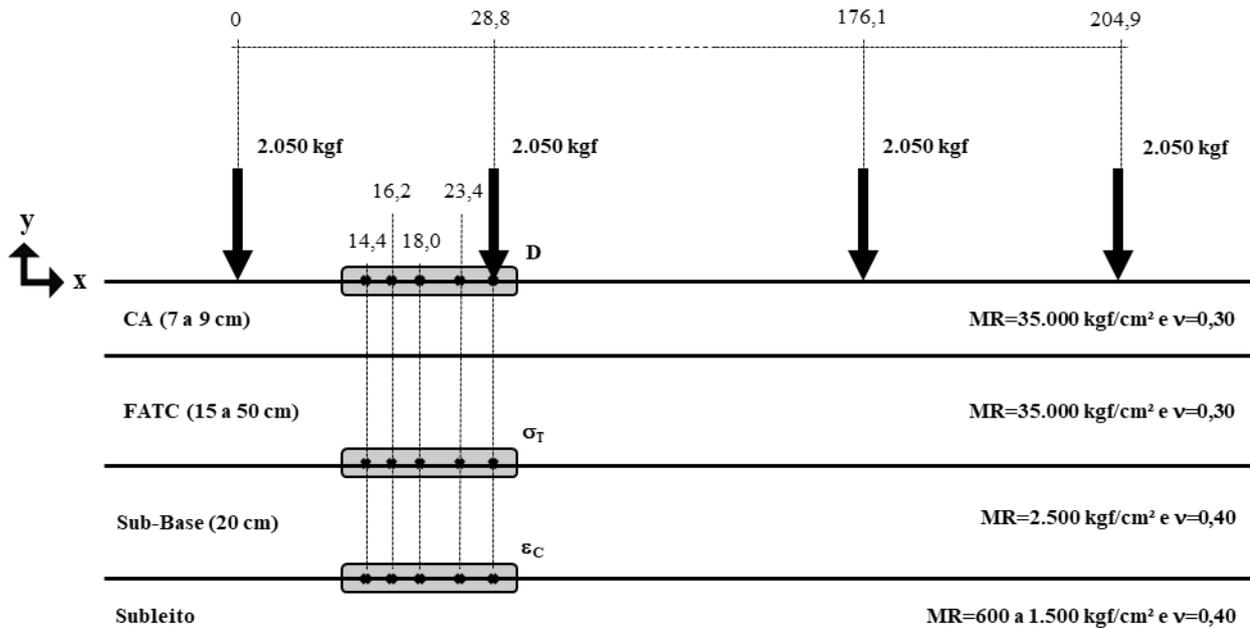


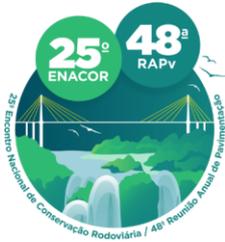
Figura 1: Posição carregamentos

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados para os dimensionamentos conforme as metodologias descritas anteriormente estão apresentadas na sequência para cada um dos cenários de tráfego e capacidade de suporte do subleito considerados. Conforme já mencionado anteriormente, as espessuras de sub-base foram fixadas em 20 cm e as espessuras de revestimento foram fixadas em 7 cm para os níveis de tráfego [1] e [2] e em 9 cm para o nível de tráfego [3]. Desta forma, a Tabela 4 apresenta apenas a espessura dimensionada da camada de base em FATC para atendimento a todos os indicadores estruturais analisados: deflexão na superfície (D), tensão de tração horizontal na camada cimentada (σ_t) e deformação vertical de compressão no topo do subleito (ϵ_c).

A partir dos resultados observados na Tabela 4, é possível se verificar que as espessuras verificadas pela metodologia do DNIT foram predominantemente inferiores aos demais modelos considerados. Para os cenários dimensionados pelo método do DNIT foram encontradas espessuras dimensionadas da ordem de 15 a 21 cm, enquanto nos demais métodos as espessuras variaram de 26 a 48 cm. Esta questão já poderia ser esperada, uma vez que este é um método empírico não específico para o dimensionamento de pavimentos semirrígidos, como é o caso do emprego do FATC analisado no presente estudo.

De acordo com os resultados obtidos para o primeiro nível de tráfego, é importante destacar que as espessuras variaram de 30 a 46cm para o pavimento com subleito de MR de 600 kgf/cm², de 28 a 42cm para o pavimento quando o MR é de 1.000 kgf/cm² e de 26 a 39cm para o pavimento sobre fundação com MR de 1.500 kgf/cm². Como era de se esperar, o aumento rigidez do subleito resultou na diminuição das espessuras de FATC, tendo em vista o melhor apoio das camadas de pavimento e, conseqüentemente, melhor distribuição das tensões no pavimento. Em se tratando dos modelos avaliados, é possível observar que os modelos propostos por Trichês (1993) e Balbo (1993) resultaram, no geral, nas maiores espessuras de FATC, ao passo que os modelos propostos por Ceratti



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Tabela 4: Espessuras de FATC (cm)

Modelo	NUSACE $2,00 \times 10^7$ NAASHTO $6,67 \times 10^6$			NUSACE $5,00 \times 10^7$ NAASHTO $1,67 \times 10^7$			NUSACE $1,00 \times 10^8$ NAASHTO $3,34 \times 10^7$		
	MR 600	MR 1.000	MR 1.500	MR 600	MR 1.000	MR 1.500	MR 600	MR 1.000	MR 1.500
	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²
DNIT (2006)	19	15	15	21	15	15	19	15	15
Balbo (1993)	46 [↑]	42 [↑]	39	48 [↑]	43 [↑]	40	47	42	39
50% RT	46 [↑]	42 [↑]	39	46	42	39	44	40	37
Minguela (2011)	40	37	34	41	37	35	40	36	34
Austroroads Design Guide (2017)	30 [↓]	28 [↓]	26 [↓]	32 [↓]	30 [↓]	28 [↓]	32	29 [↓]	27 [↓]
Ceratti (1991)	33	30	28	33	30 [↓]	29	31 [↓]	29 [↓]	27 [↓]
Trichês (1993)	46 [↑]	42 [↑]	40 [↑]	48 [↑]	43 [↑]	41 [↑]	48 [↑]	43 [↑]	40 [↑]

[↑] maiores valores calculados para a combinação de N e MR, com exceção DNIT.

[↓] menores valores calculados para a combinação de N e MR, com exceção DNIT.

(1991) e Austroroads Pavement Design Guide (2017) resultaram nas menores espessuras. O modelo proposto por Minguela (2011) apresentou espessuras próximas aos valores médios obtidos entre todos os modelos mecânicos.

De maneira geral, os diversos modelos avaliados apresentaram espessuras de FATC crescentes com o aumento de tráfego, ressaltando-se que a espessura de CA para o nível [3] de tráfego é de 9cm em comparação com os 7cm dos demais níveis. Em geral as metodologias aumentaram cerca de 1 a 2 cm entre o nível de tráfego [1] e [2].

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo a análise do dimensionamento de um pavimento com camada de base em fresado com adição de agregado e cimento (FATC), com variados níveis de tráfego e capacidades de suporte, partir de diferentes modelos para dimensionamento de camadas estabilizadas com cimento. As espessuras dimensionadas foram comparadas entre os modelos e entre os diferentes níveis de tráfego. As seguir são apresentadas as principais conclusões do estudo:

- O dimensionamento de uma estrutura com FATC exclusivamente pelo método do DNIT leva a valores predominantemente inferiores aos demais modelos. Foram encontradas espessuras de 15 a 20 cm, enquanto nos demais modelos as espessuras variaram de 26 a 48 cm;
- Os modelos de Balbo (1993), 50% Resistência a Tração e Trichês (1993) resultaram em espessuras muito próximas e mais elevadas que os demais modelos;
- Os modelos de Ceratti (1991) e Austroroads Pavement Design Guide (2017) resultaram em espessuras muito próximas e menores que os demais modelos;



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- O modelo de Minguela (2011) resultou em espessuras intermediárias em relação aos demais modelos;
- A variação das espessuras encontradas nos modelos utilizados, além das diversas considerações necessárias para sua utilização, torna evidente a necessidade de desenvolvimento de um modelo para previsão de desempenho específico para camadas de FATC.

O estudo foi realizado considerando modelos que não foram desenvolvidos para a aplicação em materiais com agregados reciclados, como é o caso do FATC, sendo em alguns casos necessárias algumas considerações. Recomenda-se que sejam realizados novos estudos, avaliando-se extensivamente os modelos disponíveis para materiais estabilizados, assim como iniciativas para o desenvolvimento de um modelo específico para previsão de desempenho das camadas de FATC.

Também é importante observar que as análises realizadas se restringem ao espectro de espessuras verificadas no presente estudo e não necessariamente correspondem ao desempenho e resultados reais encontrados em campo para este tipo de mistura com espessuras maiores/menores.

Para futuras pesquisas recomenda-se que se inclua na análise um estudo da sensibilidade das propriedades do FATC considerando-se simulações probabilísticas, posto que se sabe que misturas recicladas com cimento são heterogêneas e têm seu comportamento mecânico dependente de diversas variáveis.

REFERÊNCIAS

Agência de Transporte do Estado de São Paulo ARTESP. Instrução de Projeto Conservação Especial de Pavimento Publicação IP.DIN/009, 2013.

Balbo, J. T. Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrigidos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

Balbo, J. T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. TRANSPORTES, [S. l.], v. 14, n. 1, 2006.

Ceratti, J.A.P. Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

Cezaro Junior T. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes DNIT. Manual de Pavimentação. Publicação IPR 719, 2006.

Departamento de Estradas de Rodagem DERSP. Instrução de Projeto. Projeto de Pavimentação. Publicação IP-DE-P00/001, 2006.

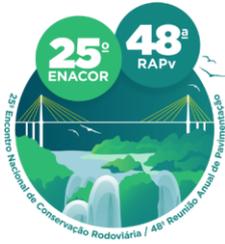
Fredrigo W., Núñez W. P., Visse A. T. A review of full-depth reclamation of pavements with Portland cement: Brazil and abroad. *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120540, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120540>.

Fedrigo, W., Núñez, W. P. Avaliação da fadiga de pavimentos reciclados com cimento usando o método de dimensionamento nacional – MeDiNA. XXXV Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, 2021

Ferreira J. G. H. M. Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaios Triaxiais Dinâmicos da COPPE/RJ. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Chapter 6: Pavement Materials (4th edition). Austroroads. Sidney, 2017.

Lima, G. G. D. A. Considerações Sobre Metodologias Para o Dimensionamento Estrutural de Pavimentos Reciclados com Camada Cimentada Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Minguela, J. D. El Estudio Del Comportamiento De Los Firmes Reciclados In Situ Con Cemento. Tese (Doutorado), Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos, Burgos, 2011.

Netto Q. M. P., Reis A. C. C. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfalto-Borracha Produzidas pelos Processos Úmidos e Seco. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, MG, 2015.

Rosa P., Lorenzo C., Pacheco A. Material Fresado – De Problema À Solução Econômica Em Obras De Pavimentação. 38ª Reunião Anual de Pavimentação 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária 38ª Rapv / 12º ENACOR, Manaus, AM, 2007.

Salini R. B. Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

Specht, L. P., Pires, G. M., Vitorello, T., Hirsh, F., Cronst, F., Bergmann, E., Tiefensee, M. D. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. 42ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

Trichês, Glicério. Comportamento na Fadiga de Misturas de Concreto Compactado a Rolo para Pavimentação. 28º RAPV. Associação Brasileira de pavimentação, 1994.