

AVALIAÇÃO MECANICISTA-EMPÍRICA DE MATERIAIS DE BASE EM PAVIMENTOS INTERTRAVADOS PARA TRÁFEGO PESADO

Felipe Silveira Cavalcanti Bezerra

Francisco de Assis Cavalcanti Bezerra

Francisco Heber Lacerda de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará

Luciana da Silva Nascimento

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Os pavimentos intertravados têm se difundido nos mais diversos contextos da infraestrutura de transportes, inclusive em cenários de tráfego pesado, fato que gera a necessidade de avaliação dos materiais utilizados na sua estrutura. Nesse sentido, este trabalho propõe-se avaliar o comportamento mecanístico-empírico da utilização dos materiais mais comumente utilizados nesse tipo de pavimentação no Brasil, tais como: concreto compactado com rolo, brita graduada tratada com cimento, solo cimento, brita graduada simples e solo brita na camada de base de um pavimento intertravado dimensionado para um tráfego pesado. Os resultados indicam que todos esses materiais podem ser utilizados na base do pavimento intertravado. Todavia, deve-se atentar para a rigidez de cada material e a resistência à tração dos materiais cimentados para que a superestrutura suporte o nível de tráfego previsto em projeto.

ABSTRACT

Interlocking pavements have become widespread in the most diverse contexts of transport infrastructure, including in scenarios of heavy traffic, fact that generates the need to evaluate the materials used in its structure. In this paper, this work proposes to evaluate the mechanistic-empirical behavior of the use of the most used materials in this type of paving in Brazil, such as: rolled compacted concrete, cement-treated crushed stone, soil cement, simple graded gravel, and soil-gravel in the base layer of an interlocked pavement sized for heavy traffic. The results indicate that all these materials can be used at the base of the interlocked pavement. However, attention should be paid to the rigidity of each material and the tensile strength of cemented materials so that the superstructure can support the level of traffic provided for in the project.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos intertravados são uma solução cada vez mais empregada nos centros urbanos, tendo em vista suas singularidades, como a manutenção de instalações subterrâneas e de correções na superestrutura com apenas a remoção dos blocos e a não necessidade de mão de obra especializada, tendo em vista que os blocos podem ser assentados manualmente (ABNT, 2011). Os pavimentos intertravados, na visão de Morgado (2008), suportam cargas elevadas e necessitam de um baixo custo de manutenção, fato que corrobora para um aumento da sua utilização no contexto das cidades.

No Brasil, o dimensionamento dos pavimentos intertravados para um elevado nível de tráfego é realizado, majoritariamente, segundo dos procedimentos de PMSP (2004), o qual recomenda a utilização de materiais cimentados na camada de base. Então, o problema analisado nesta pesquisa é a ocorrência de ruína precoce no pavimento intertravado em decorrência da utilização de um dado material na camada de base. Nesse sentido, o artigo tem como objetivo avaliar o dimensionamento de pavimentos intertravados para diferentes materiais aplicados na camada de base com auxílio de uma verificação mecanicista-empírica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O conceito utilizado para o dimensionamento de pavimentos intertravados com camadas granulares consiste em controlar as tensões de compressão no subleito. Contudo, segundo

Knapton (1998), quando houver camadas estabilizadas quimicamente na sua estrutura, faz-se necessário compatibilizar as tensões de tração dos materiais. Em relação ao revestimento em blocos pré-moldados, Cruz (2003) afirma que não ocorre fadiga, pois a existência das juntas impede a propagação das tensões de tração na fibra inferior das peças de concreto.

O dimensionamento da PMSP (2004) impõe a utilização de uma camada de base com ligante hidráulico para um nível de tráfego pesado, limitando a utilização de camadas granulares. Sobre a utilização de camadas granulares, Knapton e Barber (1980) afirmam que para pavimentos rodoviários, o pavimento intertravado usado com uma base granular obteve um resultado adequado. Os autores ainda afirmam que a consideração de apenas bases com Concreto Compactado com Rolo (CCR) é indicada para regiões onde há o empilhamento de contêineres.

As propriedades elásticas dos materiais granulares e dos materiais cimentados são distintas, tendo em vista os valores de Módulo de Resiliência (MR) e coeficiente de Poisson de cada para um mesmo estado de tensões. Em uma análise elástica, conforme Balbo (2007), quanto maior o MR de um material, melhor será sua capacidade de reter os esforços sobre si. Nesse sentido, a alteração no desempenho elástico dos materiais incorre em especificidades no dimensionamento de cada superestrutura, pois os níveis de tensões atuantes em cada material e nas camadas adjacentes são diferentes.

No que diz respeito à verificação mecanicista-empírica do dimensionamento de pavimentos intertravados apenas com camadas inferiores granulares, Bezerra *et al.* (2020) descreveram a importância de se controlar as deformações permanentes ocasionadas por ruptura plástica ou densificação. Caso o pavimento apresente alguma camada cimentada, Balbo (2007) afirma que o processo de fadiga está associado a esses materiais, sendo necessário realizar essa análise complementar de fadiga para essa camada específica.

O modelo proposto para verificação da vida de fadiga em uma base de Concreto Compactado com Rolo (CCR) foi o elaborado por Trichês (1993), o qual adotou critério de parada do ensaio a ruptura total do corpo de prova e os resultados foram ajustados por intermédio de tratamento estatístico. Então, o modelo obtido para um consumo de concreto de 120kg/m³ está apresentado a seguir na Equação 1.

$$\frac{\sigma}{f_{ct}} = 0,961 - 0,060 \log N \quad (1)$$

em que f_{ct} : Resistência à tração na flexão do CCR;
 σ : Tensão máxima de tração na fibra inferior da camada;
N: Número de repetições do eixo padrão.

A análise de fadiga da Britas Graduadas Tratadas com Cimento (BGTC) foi preconizada o modelo de Balbo (1997), o qual realizou a análise do material por meio do sistema de tensão controlada, acarretando a dispersão dos resultados em decorrência das alterações de carga durante ensaio. O modelo proposto está apresentado na Equação 2:

$$\frac{\sigma}{f_{ct}} = 0,871 - 0,054 \log N \quad (2)$$

em que f_{ct} : Resistência à tração na flexão do BGTC;
 σ : Tensão máxima de tração na fibra inferior da camada;
N: Número de repetições do eixo padrão.

Ceratti (1991) realizou uma análise de fadiga para solo cimento que avaliou a vida de fadiga de

vários tipos de solos, incluindo lateríticos e não lateríticos, concluindo que materiais com granulometria mais grossa possuem menor sensibilidade à variação da resistência à tração. O modelo utilizado no trabalho foi para um solo-cimento com solos arenosos não lateríticos, o qual está apresentado abaixo na Equação 3:

$$RT = 0,6759 - 0,01030 \log N \quad (3)$$

em que RT: Resistência à tração na flexão do solo-cimento;
N: Número de repetições do eixo padrão.

Os pavimentos intertravados admitem maiores níveis de deflexões sem ficarem inservíveis, quando possuem apenas camadas granulares, caso haja a presença de alguma camada cimentada, as deflexões devem ser limitadas com intuito de evitar fadiga da camada, conforme afirma Cruz (2003). Nesse sentido, Rahman *et al.* (2018) relatam que os mecanismos de falha de pavimentos, com bases cimentadas ou granulares, são diferentes.

Knapton e Nixon (1984) apresentam o modelo de avaliação da deformação permanente da *British Ports Association* para pavimentos intertravados com camadas cimentadas, tendo em vista o controle das deformações também para evitar acentuação do fenômeno de fadiga. A elaboração desse critério foi estabelecida por meio da retroanálise dos resultados obtidos experimentalmente. O modelo correlaciona a deformação específica vertical com o número de repetições de carga, de acordo com o apresentado na Equação 4.

$$\varepsilon = \frac{21600}{N^{0,28}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

em que ε : deformação vertical específica admissível (m/m);
N: número admissível de repetições do eixo padrão.

Rahman *et al.* (2018) indicam a utilização de um modelo distinto para pavimentos intertravados apenas com camadas granulares, pois os critérios de ruptura de materiais cimentados e materiais granulares são distintos. O modelo indicado pelos autores está apresentado na Equação 5, o qual Knapton e Nixon (1985) citam que o modelo da *British Ports Association* é mais conservador, tendo em vista a análise de superestruturas com a presença de camadas sujeitas a fadiga.

$$\varepsilon = \frac{28000}{N^{0,25}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

em que ε : deformação vertical específica admissível (m/m);
N: número admissível de repetições do eixo padrão.

Os parâmetros que serviram como premissa para a verificação mecanicista-empírica são obtidos por da análise elástica da superestrutura submetida a um carregamento padrão. Em decorrência disso, algumas simplificações podem interferir nos resultados encontrados. Ullidtz (2002) afirma que a consideração dos materiais elásticos lineares incorre em erros quando comparados com resultados obtidos em retroanálises de ensaios de deflexões.

3. MÉTODO

O dimensionamento foi realizado baseado em PMSP (2004), mais especificamente no procedimento da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, desenvolvido por Carvalho (1998). Foram realizados cinco dimensionamentos, alternando apenas o material utilizado na camada de base, para comparar o desempenho das superestruturas; devido a isso, adotou-se condições de contorno similares em todos os dimensionamentos. O número de repetições do eixo padrão (Número N) foi de $6,07 \times 10^7$, caracterizando um tráfego muito pesado. Para o subleito foi adotado um material com Índice de Suporte Califórnia (ISC) de 6%

e um Módulo de Resiliência (MR) de 72,80MPa, propriedades que representam um solo que depende da proteção da superestrutura para não sofrer uma ruptura plástica de forma precoce.

Um aspecto que vale ressaltar é que a adoção de um valor constante para o MR do subleito é uma simplificação para permitir a utilização do *software ELSYM5* de análise elástica. Os materiais granulares apresentam um valor de MR que depende do estado de tensões que atuam sobre eles. Na análise elástica foi utilizado o conceito de teoria de sistemas de camadas elásticas para obtenção do estado de tensões atuantes na superestrutura do pavimento por meio do *software ELSYM5*.

O valor de módulo de resiliência adotado para a camada de blocos foi o encontrado por Bezerra *et al.* (2020) para blocos com espessura de 10cm e uma resistência a compressão de 50MPa assentados e rejuntados corretamente. Na modelagem da superestrutura a camada de assentamento e a de blocos foram consideradas distintas tendo em vista as diferentes propriedades elásticas que implica em diferentes respostas dos materiais.

O método de dimensionamento exige para esse nível de tráfego a utilização de uma base cimentada sem especificar qualquer propriedade elástica mínima requerida para os materiais. Então, com intuito de avaliar as diferenças nas respostas estruturais de superestruturas e a sua influência na ruína do pavimento, foram dimensionadas superestruturas com a utilização dos seguintes materiais cimentados: Concreto Compactado a Rolo (CCR), Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) e Solo Cimento (SC). As espessuras e características das superestruturas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

No dimensionamento foram utilizados blocos de concreto, com formato retangular, e resistência à compressão de 50 MPa após 28 dias da sua fabricação e espessura de 10,00cm em conformidade com as exigências de Carvalho (1998) e recomendações da ABNT (2013). Na análise elástica foi considerado que os materiais utilizados na camada de assentamento e no rejuntamento foram adequados, garantindo a estabilidade do revestimento em blocos de concreto por meio de uma adequada transferência de tensões entre os blocos. Salienta-se que os valores de módulo de resiliência foram utilizados com duas casas decimais em decorrência da precisão do software utilizado.

Tabela 1: Superestrutura com base cimentada

Camada	Material	Espessura(cm)	ISC	MR(MPa)	Y
1	Bloco	10	-	2.049,72	0,15
2	Camada de Assentamento	5	-	93,19	0,30
3	Cenários 1, 2 e 3	18	-	Vide Tab. 2	Vide Tab. 2
4	Solo Estabilizado	24	30	133,86	0,40
5	Subleito	-	6	72,80	0,45

Tabela 2: Bases cimentadas

Cenário	Material	MR(MPa)	ν	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
1	CCR	19.422,80	0,17	2,00
2	BGTC	9.500,00	0,20	1,20
3	SC	7.600,00	0,30	0,50

Além disso, foram dimensionadas superestruturas com a utilização de materiais granulares na camada de base, apesar do procedimento de dimensionamento não permitir. Então, para definição da espessura da camada de base granular foi assumido o valor de base cimentada indicado no procedimento da proposto por Carvalho (1998), o qual foi corrigido com o coeficiente de equivalência estrutural apresentado por PMSP (2004), o qual tem o valor 1,65. Os materiais utilizados nas bases granulares são: Brita Graduada Simples (BGS) e Solo-Brita (SB). As superestruturas estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Superestrutura com base granular

Camada	Material	Espessura(cm)	ISC	MR(MPa)	v
1	Bloco	10	-	2.049,72	0,15
2	Camada de Assentamento	5	-	93,19	0,30
3	Cenários 4 e 5	30	-	Vide Tab. 4	Vide Tab. 4
4	Solo Estabilizado	24	30	133,86	0,40
5	Subleito	-	6	72,80	0,45

Tabela 4: Bases granulares

Cenário	Material	MR(MPa)	v
4	BGS	250,00	0,35
5	SB	150,00	0,38

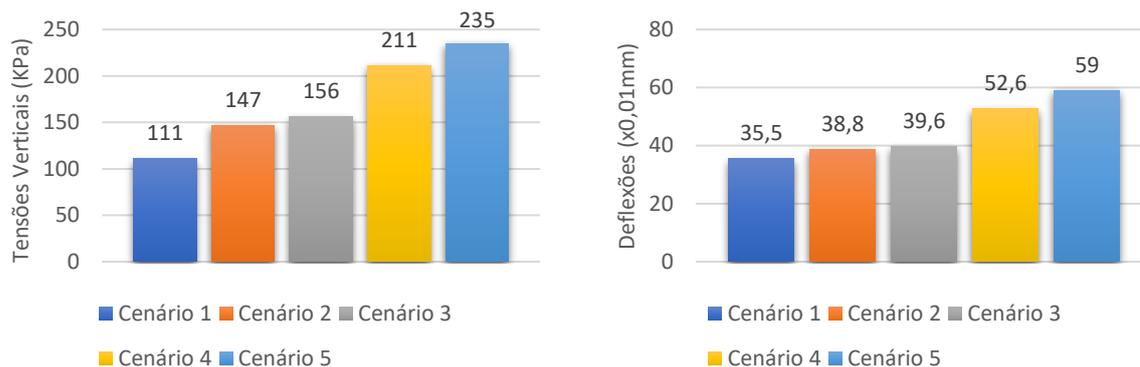
A espessura da camada de assentamento foi o preconizado por ABNT (2011). O material definido para a camada de sub-base apresenta os requisitos exigidos por PMSP (2004), mesmo assim apresenta uma grande dependência das camadas superiores para atenuação de carga com o fito de não ocorrer ruptura plástica no material, fato que evidencia a importância da utilização de um material adequado na camada de base.

4. RESULTADOS

4.1. Estudo do Estado de Tensões

Com a definição dos materiais utilizados no pavimento intertravado e suas respectivas espessuras, torna-se possível a realização de uma análise de tensões atuantes no pavimento, por intermédio da teoria de sistemas de camadas elásticas. Sendo assim, por meio da análise dos resultados obtidos observa-se diferença no estado de tensões com a alteração dos materiais de base, principalmente com a utilização ou não de materiais cimentados.

A utilização de materiais cimentados na camada de base permite uma maior capacidade do pavimento em atenuar as tensões nas camadas inferiores, tendo em vista uma maior rigidez. Desse modo, observa-se uma menor exigência da camada de sub-base e de subleito em suportar cargas. Na Figura 1(a) pode-se observar as tensões verticais que alcançam o topo do subleito. As deflexões na superestrutura também são dependentes da sua rigidez, pois quanto mais rígido, maior o nível de energia para obter-se um mesmo nível de deformação, conforme exposto pela Lei de Hooke. Assim, os pavimentos com materiais mais rígidos apresentam menores níveis de deflexões, conforme o exposto na Figura 1(b).



(a) Tensões verticais no topo do subleito

(b) Deflexões no topo revestimento

Figura 1: Tensões verticais e deflexões no topo do subleito e do revestimento.

A avaliação dessas duas variáveis torna-se relevante pois se relacionam com os principais modos de ruína do pavimento intertravado. Apesar de o revestimento em blocos intertravados não sofrerem ruína por fadiga, a utilização de materiais cimentados incorre na atenção do fenômeno de fadiga nessa camada. Severi *et al* (1999) citam que existem modelos de avaliação da vida de fadiga dos materiais a partir dos níveis de deflexões encontrados, pois maiores deflexões induzem a acentuação do efeito de placa nas camadas rígidas, o qual intensificam os esforços de tração na fibra inferior da camada rígida.

Portanto, verifica-se que quanto maior a rigidez da camada de base, menores são as deflexões no pavimento, fato que incita uma maior vida de fadiga do material cimentado considerado a mesma resistência à tração na flexão. Todavia, os materiais menos nobres, os quais apresentam uma menor rigidez, apresentam a tendência de possuir valores mais baixos de resistência à tração na flexão do que materiais com rigidez mais elevada, facilitando a ocorrência de fadiga nesses materiais.

A avaliação dos níveis de tensão atuantes no subleito também é relevante, pois há correlação com a ruptura a cisalhamento. Com uma análise das tensões verticais obtidas no topo do subleito das superestruturas com bases cimentadas em comparação com base granulares, justifica-se a utilização de dois critérios de falha diferente para ruptura plástica, tendo em vista a diferença entre os valores.

4.2. Verificação Mecanicista-Empírica

No Cenário 1 foi realizada a verificação mecanicista-empírica avaliando a ruptura por fadiga da base cimentada e a ruptura por cisalhamento do subleito. O modelo utilizado para avaliação da fadiga foi o proposto por Trichês (1993) para CCR com um consumo de concreto de 120kg/m^3 e modelo proposto para avaliação de ruptura plástica do subleito foi o citado por Knapton e Nixon (1984) para avaliação de superestruturas com camadas cimentadas. Os critérios obtidos estão apresentados abaixo com as repostas elásticas encontradas na Tabela 5.

Tabela 5: Verificação Mecanicista – Cenário 1

Deformação Vertical no subleito (mm/mm)		Tensão Máxima de Tração na Fibra Inferior do CCR (KPa)	
Admissível	Calculada	Admissível	Calculada
$1,65 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$	987,98	846,00

Conclui-se que a superestrutura é aprovada para o nível de tráfego analisado. Observa-se que o desempenho da superestrutura na proteção contra a ruptura plástica do subleito está satisfatório e a avaliação de fadiga da base cimentada encontra-se adequada com o critério proposto. Caso o material possua um valor inferior ao estipulado poderá ocorrer a fadiga da camada cimentada, pois a tensão máxima admissível de tração na fibra inferior do CCR estipulada pelo modelo supracitado diminuirá. Assumindo o mesmo estado de tensões, quando a resistência à tração do material for inferior 1,72MPa, ocorrerá a fadiga do material.

Um indicador relevante para estimativa das tensões de tração na fibra inferior das camadas cimentadas é as deflexões do pavimento, a superestrutura representada no cenário 1 foi a que apresentou os menores níveis de deflexão. Apesar disso, os valores de tensões encontrados foram próximos dos estabelecidos pelo avaliação mecanicista-empírica para um material com resistência à tração na flexão de 2,00MPa.

A verificação mecanicista-empírica no Cenário 2 foi feita avaliando-se a fadiga da base cimentada e a ruptura plástica do subleito também. O modelo adotado na análise de fadiga foi o proposto por Balbo (1997) e para a verificação de ruptura por cisalhamento foi citado por Knapton e Nixon (1984) para superestruturas com camadas rígidas. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Verificação Mecanicista – Cenário 2

Deformação Vertical Admissível no Subleito (mm/mm)	Deformação Vertical Calculada no Subleito (mm/mm)	Tensão Máxima de Tração Admissível na Fibra Inferior do BGTC (KPa)	Tensão de Tração Calculada na Fibra Inferior do BGTC (KPa)
$1,65 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$	541,00	673,00

Nesse caso, a superestrutura não suporta o nível de tráfego de projeto, pois ocorre a ruína por fadiga da base cimentada, enquanto a avaliação da ruptura plástica do subleito não indica ocorrência de falha precoce, apesar de que os resultados encontrados sejam bem ajustados ao critério. Observa-se que as tensões de tração na fibra inferior da BGTC são inferiores aos valores em encontrados no CCR no Cenário 1, todavia ocorre a ruína precoce porque a tensão máxima de tração admissível na fibra inferior da BGTC também diminui consideravelmente em relação ao valor encontrado no Cenário 1.

Apesar de o material possuir uma menor rigidez, conseqüentemente uma menor retenção de cargas sobre si, não é suficiente, pois deve-se buscar uma relação entre o MR da camada e a resistência à tração na flexão adequada que permita que as tensões atuantes no pavimento não causem a ruína de fadiga para o número de repetições de carga de projeto. Balbo (1997) cita que BGTC, quando executadas em condições adequadas de umidade, podem alcançar valores

de resistência à tração na flexão próximos ao do CCR. No entanto, em campo, dificilmente tem-se o controle de laboratório para encontrar esses valores. Para as condições de contorno adotadas, a BGTC conseguiria resistir ao tráfego na geometria indicada para superestrutura quando apresentasse uma resistência à tração na flexão superior ou igual 1,50MPa.

Balbo (2007) afirma que pavimentos com camadas cimentadas, quando construídos, terão respostas de camadas granulares quando esses materiais sofrerem ruína por fadiga. Desse modo, as distribuições de esforços na superestrutura serão diferentes da analisada no dimensionamento, fato que pode incitar a ruptura plástica do pavimento já que para uma idêntica atenuação de esforços de uma camada granular necessita-se de uma espessura superior do que um material cimentado, tendo vista os diferentes valores de coeficiente estrutural. Dessa forma, uma superestrutura que outrora apresentava um desempenho satisfatório a ruptura plástica do subleito terá uma tendência a ruir por esse modo de ruptura também, tendo em vista que os esforços atingiram o subleito bem mais concentrados.

Para o Cenário 3, o procedimento de avaliação é idem ao dos cenários anteriores, tendo em vista tratar-se de um pavimento intertravado com camadas cimentada. Foi utilizado o modelo proposto por Ceratti (1991) na análise de fadiga base cimentada em SC com solos arenosos não lateríticos e o modelo citado por Knapton e Nixon (1984) na avaliação da ruptura plástica do subleito, conforme os resultados apresentados a seguir na Tabela 7.

Tabela 7: Verificação Mecanicista – Cenário 3

Deformação Vertical Admissível no Subleito (mm/mm)	Deformação Vertical Calculada no Subleito (mm/mm)	Resistência à Tração Mínima na Flexão do SC (MPa)	Resistência à Tração na Flexão do SC (MPa)
$1,65 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-4}$	0,60	0,50

Em ambas as análises, ocorreu a ruína precoce, tendo em vista a utilização de um material com propriedades elásticas mais pobres do que os utilizados nos cenários 1 e 2. A ruptura por fadiga era esperada, tendo em vista que o material cimentado possui uma rigidez um pouco inferior a BGTC, todavia apresenta valores resistência à tração na flexão consideravelmente inferiores.

Para superestrutura dimensionada obter um valor de deformação vertical no topo do subleito de $1,65 \times 10^{-4}$, faz-se necessário aumentar a espessura da camada de SC para 19cm, mantendo o MR. Diante de tal situação, constata-se a relevância da consideração das propriedades elásticas dos materiais cimentados no momento do dimensionamento, considerando a grande variabilidade das propriedades elásticas dos materiais.

Balbo (2006) afirma que para BGTC há uma propagação acelerada de fissuras, favorecendo uma ruína precoce por fadiga, devido à elevada presença de vazios nos quais há concentração de tensões por não consistir em um material cimentado com matriz homogênea. O SC também não apresenta uma matriz homogênea, fato que incorre nos mesmos fenômenos de acelerada propagação de fissuras, pois não há pasta de cimento preenchendo consistentemente as partículas do agregado.

A avaliação do Cenário 4 consistiu na verificação mecanicista-empírica apenas da ruptura plástica do subleito, não houve necessidade de verificação à fadiga já que se trata de um

pavimento intertravado com camadas granulares. O critério de ruína por cisalhamento utilizado foi diferente dos adotados nos cenários anteriores, já que não há preocupação adicional com a acentuação do efeito de fadiga nas camadas cimentadas. Então, utilizou-se o modelo exposto por Rahman *et al* (2018) para avaliação dos mecanismos de falha dos materiais granulares. Na Tabela 8 estão apresentados os valores encontrados.

Tabela 8: Verificação Mecanicista – Cenário 4

Deformação Vertical Admissível no Subleito (mm/mm)	Deformação Vertical Calculada no Subleito (mm/mm)
$3,17 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-4}$

A avaliação identificou que a superestrutura dimensionada no Cenário 4 não sofre ruína de maneira precoce para as condições de contorno estudadas, diferentemente dos cenários 2 e 3, que utilizaram um material cimentado. Apesar da deformação vertical no subleito elevar-se 62,50% em relação ao valor encontrado no Cenário 3, o pavimento consegue ter um desempenho satisfatório tendo em vista o mecanismo de falha distinto.

Um aspecto interessante é o aumento da espessura da camada de base de 18cm para 30cm devido à alteração de material cimentado para granular. De acordo com o critério analisado, a superestrutura ainda possui uma margem entre o valor estabelecido pelo modelo como o limite e a deformação vertical encontrada no subleito. Diante desse resultado, pode-se diminuir a espessura da camada de base granular até um ponto que a deformação admissível do subleito convergir para o critério estabelecido.

Realizando a análise elástica proposta, verifica-se que se pode diminuir a espessura da camada de base granular utilizada no Cenário 4 para 26cm, a qual encontra-se um valor de deformação vertical do subleito de $3,13 \times 10^{-4}$. Cabe uma análise a respeito da diminuição da espessura da base granular até próximo do valor de equilíbrio limite, pois com a presença de umidade superior a ótima perde-se capacidade de suporte e qualquer mínima variação de desempenho levará a valores de deformações verticais no topo do subleito superior ao admissível.

Por fim, a análise do Cenário 5 baseou-se na verificação da ruptura plástica do subleito, tendo em vista a concepção da superestrutura ser um pavimento intertravado apenas com camadas granulares também. O modelo adotado foi o citado por Rahman *et al* (2018) para avaliação da ruptura por cisalhamento, conforme na Tabela 9.

Tabela 9: Verificação Mecanicista – Cenário 5

Deformação Vertical Admissível no Subleito (mm/mm)	Deformação Vertical Calculada no Subleito (mm/mm)
$3,17 \times 10^{-4}$	$3,11 \times 10^{-4}$

Mesmo com a utilização do solo-brita, o qual possui propriedades elásticas piores do que o BGS, a superestrutura foi aprovada, segundo os critérios estabelecidos. Para obtenção desse resultado admite-se que haja adequadas condições de drenagem, evitando a penetração elevada das águas superficiais nas camadas do pavimento, ocasionando perda da capacidade de suporte. Nesse caso, o valor encontrado na análise de tensões foi próximo ao estabelecido no critério.

Cabe uma análise a respeito das diferenças entre as respostas das superestruturas com camadas

granulares em relação a utilização da base cimentada, pois evidenciou-se que caso não se tenha um controle sobre as propriedades elásticas dos materiais, há uma tendência da ruína por fadiga de maneira precoce das camadas cimentadas. Em contrapartida, não há preocupação com fadiga de nenhuma camada quando há apenas camadas granulares, fato que permite a utilização de critérios menos rigorosos a respeito do estado de tensões das camadas do pavimento.

Da mesma forma que a variação das propriedades elásticas das bases cimentadas geram diferentes respostas estruturais, os materiais granulares também apresentam essa variabilidade. Portanto, outro aspecto que necessita ser ponderado trata-se de que os mesmos materiais com propriedades distintas podem ocasionar resultados diferentes, assim uma análise criteriosa a cada caso de dimensionamento é sugerida para constatar se a superestrutura será capaz de suportar o nível de tráfego de projeto com o subleito existente. Ademais, salienta-se que, além das variações entre tipos de materiais diferentes, há variabilidade dentro dos mesmos materiais.

Uma fragilidade da análise obtida trata-se de que os modelos utilizados necessitam ser calibrados com o local onde esse pavimento seria implementado, tendo em vista as diversas peculiaridades de cada região. Os modelos utilizados foram elaborados em locais diferentes que possuem características de clima e de tráfego distintas que implicam no processo de degradação do pavimento.

A utilização de pavimento intertravado apenas com camadas granulares mostrou-se uma alternativa tão adequada quanto com a utilização de camadas cimentadas, pois os revestimentos admitem maiores níveis de deflexões do que alternativas usais. Independentemente, da concepção dos materiais constituintes da superestrutura percebe-se a relevância da verificação mecanicista-empírica na previsão de possíveis falhas, otimizando, assim, o dimensionamento.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho constatou que a utilização de bases granulares em pavimento intertravado para níveis de tráfego pesado é uma alternativa viável que deve ser considerada como alternativa no momento do dimensionamento. Os resultados obtidos para essas superestruturas obtiveram êxito em resistir o tráfego durante sua vida de projeto. Assim, tais pavimentos podem ser mais flexíveis em decorrência de não haver fadiga em nenhuma das camadas.

Outrossim, observa-se a relevância da análise do parâmetro de resistência à tração dos materiais cimentados no momento do dimensionamento para o controle do dano à fadiga desses materiais, tendo em vista sua grande variabilidade. As superestruturas comuns com bases de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) e de Solo-Cimento (SC), que sofreram ruína precoce, poderiam ser ajustadas para suportar todo o tráfego previsto apenas realizando um controle da resistência à tração ou ajuste na sua espessura.

Portanto, a utilização de todos os materiais avaliados neste artigo é tecnicamente viável, desde que haja um controle de suas propriedades elásticas, compatibilizando a geometria e os carregamentos que o serão impostos ao pavimento. A exclusão da possibilidade de utilização de materiais granulares em alguns métodos de dimensionamento de pavimentos intertravados trata-se de uma limitação, pois os materiais atingem resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2011) *NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – execução*. Associação Brasileira de Normas e Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (2013) *NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio*. Associação Brasileira de Normas e Técnicas, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T. (1997) *High quality cement treated crushed stones for concrete pavement bases*. International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, Indiana, USA, p. 195-207.
- Balbo, J. T. (2006) Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. In: *TRANSPORTES*, v. XIV, n. 1, junho de 2006.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Bezerra, F. S. C.; C. M. G, Gonzaga. e F. H. L., Oliveira (2020) Influência da resistência à compressão e da espessura dos blocos de concreto e as espessuras das juntas na deformação permanente dos pavimentos em blocos intertravados. In: *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, 34. 100% digital. Anais. 100% digital: ANPET. p. 1-11.
- Carvalho, M. D. (1998) *Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto*. 4. Ed, São Paulo, Associação de Cimento Portland, 32p.
- Ceratti, J. A. P. (1991) *Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos*. 314 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- Cruz, L. O. M. (2003) *Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento*. 2003. 281 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Knapton, J. (1998) The north American Port Pavement Design Manual. In: *Third International Workshop on Concrete Block Paving*, Cartagena de Indias, Colombia, May 10-13.
- Knapton, J; N, Nixon (1984) Concrete Block Pavement Design in The U.K. In: *Second International Conference on Concrete Block Paving*, April 10-12.
- Knapton, J; N, Nixon (1985) The Structural Design of Heavy-Duty Concrete Block Pavements. In: *Workshop on Interlocking Concrete Pavements*, UK.
- Knapton, J; S. D, Barber (1980) Structural design of block pavements for ports. In: Jeffery, H. *Concrete block paving: proceedings of the First International Conference on Concrete Block Paving*, Newcastle-upo-Tyne, 2-5 September.
- Morgado, P. R. S. (2008) *Concepção e Dimensionamento de Pavimentos em Blocos*. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- PMSP (2004) IP – 06/2004: *Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto*. São Paulo.
- Rahman et al. (2018) Mechanistic design of concrete block pavements. In: *2018 AGS Victorian Symposium – Geotechnics and Transport Infrastructure*, Wednesday, 24 October 2018, Melbourne.
- Severi, A. A. et al (1999). Verificação à fadiga de revestimentos asfálticos e bases cimentadas "Programa Pavimentos Asfálticos v.1.0". In: *Anais do 3. SINAPPRE*. Rio de Janeiro: ABPV.
- Trichês, G. (1993) *Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento*. 365 f. 76 Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Ullidtz, P. (2002) *Analytical Tools for Design of Flexible Pavements*. Technical University of Denmark.

Felipe Silveira Cavalcanti Bezerra – felipesilveiracb@hotmail.com

Francisco de Assis Cavalcanti Bezerra – assisbezerradrenagem@yahoo.com.br

Francisco Heber Lacerda de Oliveira – heber@det.ufc.br

Luciana da Silva Nascimento – luciana.nascimento@alu.ufc.br

Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza, CE. Brasil.