



Análise da origem das manifestações patológicas em pavimento de concreto de uma rodovia pelo método dos elementos finitos: estudo de caso

F. Bolina¹, B. Tutikian²

¹ITT Performance, Mestrando PPGArqUrb, Unisinos. Brasil

²ITT Performance, Professor PPGArqUrb, Unisinos. Brasil

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4.i3.67>

Artículo recibido el 12 de Julio de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 10 de Septiembre de 2014. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2015 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2015.

RESUMO

No que tange assuntos concernentes à infraestrutura, observa-se que a rodovia brasileira Mário Quintana, a chamada ERS-118, situada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, anuncia-se em circunstâncias alarmantes de conservação e trafegabilidade devido ao elevado grau de deterioração do pavimento. O objetivo deste trabalho é analisar as possíveis causas que culminaram no surgimento de manifestações patológicas nas placas de concreto desta rodovia. O estudo baseou-se na análise estrutural destes elementos. Para tanto, este trabalho fundamentou-se no método de dimensionamento por elementos finitos e na subsequente análise dos resultados pela correlação entre tensões produzidas *versus* número admissível de eixos passantes. O estudo foi dividido em três partes: (1º) método de análise estrutural das placas, (2º) discussão dos resultados e (3º) conclusão. Como resultado, verificou-se que muitas das manifestações patológicas podem ter provindo do efeito térmico resultante sobre as placas.

Palavras chave: patologia; pavimentos; concreto.

ABSTRACT

Regarding issues pertaining to infrastructure, it is observed that the Brazilian's highway Mário Quintana, call ERS-118, located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, announces in alarming conservations circumstances and trafficability due to the high deterioration degree of the pavement. The objective of this work is to analyze the possible causes that produced the pathological manifestations in the pavement concrete. The study was based on the structural analysis of these elements. Therefore, this study was based on the method of finite elements and subsequent analysis of the results produced by the correlation between stress *versus* number of permissible axle bushings. The study was divided into three parts: (1) method of pavement's structural analysis, (2) discussion of the results and (3) conclusion. As a result, it was found that many of the pathological manifestations may have stemmed from the thermal effects arising in the pavement concrete.

Keywords: pathology; pavements; concrete.

Autor de contato: Fabricio Bolina (fabriciobolina@gmail.com)

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 3, Septiembre - Diciembre 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

Nunca se vendeu tantos veículos no Brasil. E nunca a discussão sobre congestionamentos esteve tão presente na vida dos brasileiros. Este incremento descomedido do tráfego de veículos automotores emerge, com veemência, debates concernentes à infraestrutura, tornando-se progressiva a relevância da necessidade de construção, ampliação e recuperação das rodovias deste país, de modo a absorver satisfatoriamente a volumetria de tráfego demandada.

Neste contexto, os pavimentos de concreto de cimento Portland vêm ocupando um espaço cada vez mais amplo no processo de desenvolvimento urbano e rodoviário (Balbo, 1989). Entretanto, devido ao efetivo desconhecimento do comportamento dos materiais ao longo do tempo, da carência de algumas normas regulamentadoras e da inexistência de ferramentas computacionais de cálculo mais precisas, o que se observa hoje são inúmeras obras deste tipo com vida útil findada precocemente.

No universo das estradas brasileiras pavimentadas com placas de concreto, a rodovia estadual Mário Quintana, a chamada ERS-118, apresenta-se com níveis alarmantes de deterioração destes elementos. Situada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, trata-se de uma estrada com inauguração datada de 1977 que, possuindo 80,2 km de extensão, liga a cidade de Sapucaia do Sul, na região metropolitana, ao litoral sul do estado. Uma ilustração típica do estado de conservação desta rodovia é apresentada na Figura 1 e Figura 2.



Figura 1. Fissuras lineares observadas nas placas de concreto da rodovia ERS-118, nas proximidades do Km 20.



Figura 2. Fissuras lineares observadas nas placas de concreto da rodovia ERS-118, nas proximidades do Km 23.

Com o intuito de estudar as prováveis causas do surgimento e propagação das manifestações patológicas das placas de concreto desta rodovia, este trabalho objetiva-se na simulação e análise estrutural destas placas.

A modelagem e simulação estrutural destes elementos foram realizadas segundo o método dos elementos finitos, com o auxílio do software computacional STRAP 2011. Posteriormente, a análise da fadiga das placas foi fundamentada na relação entre tensões e número admissível de repetições de carga, proposta, devido à inexistência de uma norma regulamentadora nacional, no manual de pavimentos rígidos do DNIT IPR-714 (2005).

O trabalho é discorrido em três partes: (a) método de análise estrutural das placas, (b) discussão dos resultados e (c) conclusão. No primeiro item é descrita a fundamentação teórica do método dos elementos finitos e do método de avaliação das tensões nas placas propostas pelo DNIT, além dos critérios admitidos no cálculo destes elementos. No segundo item são discutidas as respostas obtidas com a aplicação de cada método. Finalmente, no último item, presume-se a origem das manifestações patológicas desta rodovia.

Para a análise estrutural, as propriedades do concreto foram apoiadas na resistência à compressão característica de projeto informado por engenheiros que participaram da execução das placas, dado a inacessibilidade do projeto original desta rodovia. As demais propriedades mecânicas admitidas foram deduzidas numericamente através deste f_{ck} , por intermédio de formulações matemáticas fornecidas pela norma brasileira ABNT NBR 6118:2014.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As vantagens da aplicação dos pavimentos de concreto são, em essência, a resistência ao tráfego intenso e pesado, vida útil teoricamente elevada, superfície indeformável, maior visibilidade quando comparada ao pavimento asfáltico, melhor aderência e custos reduzidos de manutenção (Senço, 1997). O pavimento de concreto torna-se ainda mais interessante quando considerados os menores montantes de recursos exigidos em medidas de reabilitação (Severi, 2002).

Entretanto, como qualquer outra estrutura constituída deste material, uma deficiência de projeto e/ou inexistência de manutenção adequada não raramente culmina no surgimento de manifestações patológicas de significativa intensidade, acarretando, não raras vezes, em custos de reparo ou substituição elevados (Helene, 2007). Pavimentos de concreto são elementos constantemente submetidos a esforços, seja devido ao tráfego (Oliveira e Correia, 2009) ou a variações volumétricas de origem térmica (Bialas e Mróz, 2006), que, atuando em conjunto, submetem as placas a elevadas tensões, as quais potencialmente induzem fissuras à superfície destes elementos. Deste conjunto de fenômenos, cabe destacar, portanto, que provém fundamental o entendimento das teorias marginais que permeiam estes sistemas, exigindo uma maior fundamentação conceitual do que tradicionalmente se dedicou no caso dos pavimentos flexíveis e asfálticos (Balbo, 2009).

Neste contexto, o método dos elementos finitos emerge como uma boa técnica numérica para obtenção de solução aproximada de problemas que envolvem a verificação e o dimensionamento de placas de concreto, sendo uma ótima ferramenta para a determinação do estado de tensões e deformações de uma estrutura sujeita a ações externas (Medina e Motta, 2005).

O efeito combinado entre cargas e gradientes térmicos positivos eleva expressivamente a tensão de tração na flexão das placas de concreto (Severi, 2002), sendo esta solicitação mecânica diretamente influenciada pela capacidade suporte da fundação do pavimento (Ashtakala e Poorooshasb, 1989), provindo tanto menor esta deflexão quanto maior a capacidade resistente do solo (Colley e Humphery, 1966; Colim *et al.*, 2011). Contudo, partindo de soluções analíticas e numéricas, comprova-se que tensões oriundas de gradientes térmicos chegam a representar 33% da tensão total gerada pelas cargas dos veículos, sendo, portanto, bastante significativas (Balbo, 1966).

Deste pressuposto, no Brasil, os modelos clássicos de comportamento dos pavimentos rígidos baseados na fadiga do concreto sob a ação de cargas repetidas fornecem interpretações bem concisas dos fenômenos que podem levar o pavimento de concreto ao colapso (DNIT, 2005).

Contudo, algumas vezes, por ausência do conhecimento de hipóteses das diversas teorias de pavimentação, assume-se uma postura incorreta sobre alguns aspectos técnicos e práticos de projeto. Um bom conhecimento das teorias, ainda que apenas dos seus principais aspectos, permite aos engenheiros um julgamento mais adequado dos métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto (Balbo, 2009), bem como na reabilitação de elementos anômalos, ou seja, com incidências de manifestações patológicas (Oliveira e Correia, 2009).

3. MÉTODO DE ANÁLISE ESTRUTURAL DAS PLACAS

O método dos elementos finitos (MEF) é uma análise numérica que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais parciais e resolvidos por modelos matemáticos. Destarte, a placa foi simulada como uma malha de elementos contínuos com propriedades idênticas e pontos nodais igualmente espaçados. Como auxílio, foi empregado o software computacional STRAP 2011 que realiza, por interpolação entre nós, a resolução matricial do problema. O objetivo é obter a solução para distribuição de tensões e deformações em todo o domínio (nós) da estrutura.

A estrutura foi admitida no modelo como sendo uma placa de concreto elástica, isotrópica, homogênea e em equilíbrio com o meio, apoiadas em uma fundação cujas reações são exclusivamente verticais e diretamente proporcionais às deformações da placa, segundo um coeficiente de recalque k .

Esta representação da capacidade de suporte do solo por coeficientes de mola k , chamado de modelo *winkleriano* de fundação, simula satisfatoriamente a interação solo-estrutura (Balbo, 2009). Foi considerado um conjunto de molas de Hooke com constantes elásticas idênticas, formando um colchão de molas. Essas molas trabalham independentes umas das outras dentro do conjunto, não havendo transmissão de esforços de cisalhamento entre elementos.

Sabe-se que o solo empregado para compor a sub-base do perfil de aterro desta rodovia é argiloso. Porém, devido a inexistência de dados do projeto original, pouco se sabe sobre o grau de plasticidade desta argila. Assim, como CBR deste solo, admitiu-se uma média dos CBRs típicos para argilas variando de plásticas à elastoplásticas. Foi admitido, inicialmente, um CBR médio de 9% e um coeficiente k médio de 30MPa/m.

Segundo DNIT IPR-714 (2005), através do emprego de sub-bases de CCR, há um incremento do coeficiente de mola. Para um k médio de 30MPa/m, admite-se como razoável, nos modelos de cálculo, a utilização de um k de 101MPa/m. Será este, portanto, o coeficiente admitido.

O modelo estrutural adotado é composto por placa individual de 3,5m de largura, 6m de comprimento e espessura de 20cm, tal qual a geometria média das placas observadas *in loco*. Além do colchão de molas em toda a superfície inferior da placa, junto ao bordo, foram inseridos apoios de segunda espécie, com o propósito de simular a restrição ao movimento proporcionado pelas placas vizinhas junto ao plano longitudinal.

Através de informações coletadas junto a engenheiros que participaram de alguma etapa do projeto ou da execução destas placas, sabe-se que o f_{ck} do concreto é de 45MPa. As demais propriedades mecânicas do concreto podem ser, portanto, estimadas segundo este índice (aplicando a ABNT NBR 6118:2014) e estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do concreto admitidas na simulação estrutural das placas

| Propriedades do concreto | |
|--------------------------|---------|
| f_{ck} (MPa) | 45 |
| E_{cs} (GPa) | 31,93 |
| G_c (GPa) | 12,77 |
| ν | 0,2 |
| ΔT (°C) | 0,00001 |

Para a análise das tensões desenvolvidas sobre as placas, foram adotados nas simulações os seguintes carregamentos: (a) peso próprio do concreto simples: 24kN/m³; (b) gradientes de temperatura: 0°C, +5°C, +10°C, +15°C e +20°C e (c) eixo simples com rodado duplo: 100kN. O fator de segurança para as cargas: 1,20 (conforme recomendado pela ABCP para pavimentos a serem dimensionados considerando grande frequência de caminhões).

O eixo admitido é do tipo simples de 10t com rodado duplo. Este eixo foi definido como sendo uma carga móvel percorrendo toda a extensão da placa, com progressão de 10cm, sendo posicionado em: (a) junto ao eixo da placa; (b) a 20cm do bordo longitudinal da placa e (c) passando perpendicular ao maior lado da placa (simulando placas de cruzamentos). A área de contato dos pneus do eixo foram definidas com dimensões de 16x24cm, com tensão de contato de 649 kN/m² cada.

Nos pavimentos de concreto a espessura necessária da placa está íntima e diretamente ligada às tensões de tração na flexão produzidas pelas cargas solicitantes e à relação entre aquelas e a resistência do concreto à tração na flexão. A inter-relação entre estas relações de tensões e o número de repetições de carga admissíveis está apresentada na Tabla 2.

Tabela 2. Relação de tensões e número admissível de repetição de carga (DNIT, 2005)

| Relação de tensões | Nº admissível de repetições de carga | Relação de tensões | Nº admissível de repetições de carga | Relação de tensões | Nº admissível de repetições de carga |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 0,50 | Ilimitado | 0,62 | 18000 | 0,74 | 650 |
| 0,51 | 400000 | 0,63 | 14000 | 0,75 | 490 |
| 0,52 | 300000 | 0,64 | 11000 | 0,76 | 360 |
| 0,53 | 240000 | 0,65 | 8000 | 0,77 | 270 |
| 0,54 | 180000 | 0,66 | 6000 | 0,78 | 210 |
| 0,55 | 130000 | 0,67 | 4500 | 0,79 | 160 |
| 0,56 | 100000 | 0,68 | 3500 | 0,80 | 120 |
| 0,57 | 75000 | 0,69 | 2500 | 0,81 | 90 |
| 0,58 | 57000 | 0,70 | 2000 | 0,82 | 70 |
| 0,59 | 42000 | 0,71 | 1500 | 0,83 | 50 |
| 0,60 | 32000 | 0,72 | 1100 | 0,84 | 40 |
| 0,61 | 24000 | 0,73 | 850 | 0,85 | 30 |

Uma peça de concreto submetida a ciclos reiterados de carregamento pode vir a romper após certo número de repetições de carga, mesmo que a máxima tensão produzida por estas não extrapole a resistência do concreto à tração na flexão. Este fenômeno é conhecido como ruptura por fadiga do concreto. Devido a não realização do estudo de volumetria do tráfego existente, não será possível a verificação quanto à fadiga do concreto destas placas. Contudo, é possível realizar uma análise quanto ao tráfego máximo admitido para estas e, intuitivamente, obter uma conclusão sobre a competência destes elementos.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da avaliação da capacidade estrutural da placa são inferidos segundo as envoltórias das combinações máximas dos seguintes carregamentos: (a) eixo móvel dos veículos; (b) gradiente térmico sobre a placa e (c) peso próprio da placa. Foram consideradas apenas as tensões de tração na flexão junto a face inferior das placas de concreto. Apresenta-se, na Figura 3, o diagrama de mapa de contorno destas máximas tensões atuantes, empregando um gradiente térmico positivo de 20⁰C, para um veículo passando no eixo longitudinal da placa.

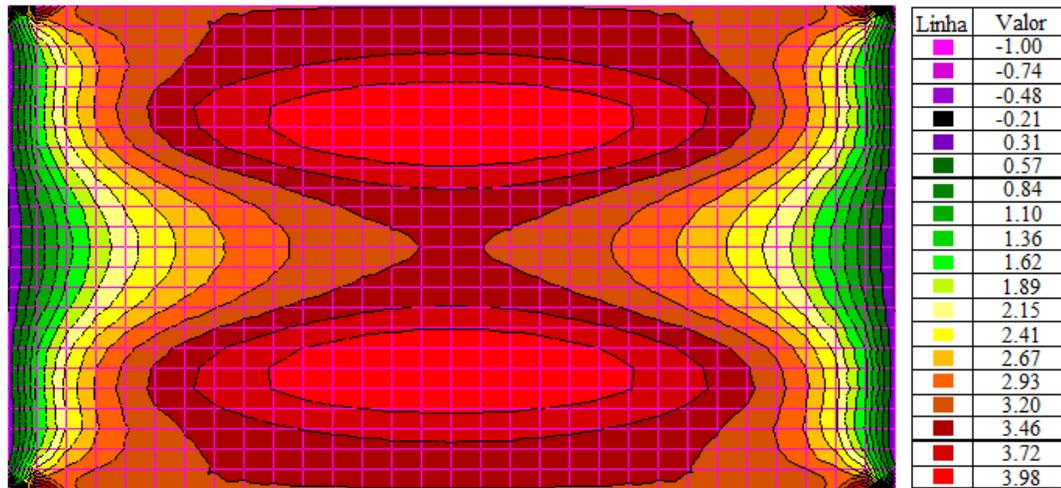


Figura 3. Tensões na face inferior da placa, com eixo de veículo passando no eixo longitudinal da placa, para um gradiente térmico de 20⁰C.

Na Figura 4 apresenta-se o diagrama de tensões atuantes para um veículo passando a 20cm da borda, submetido ao mesmo diferencial térmico.

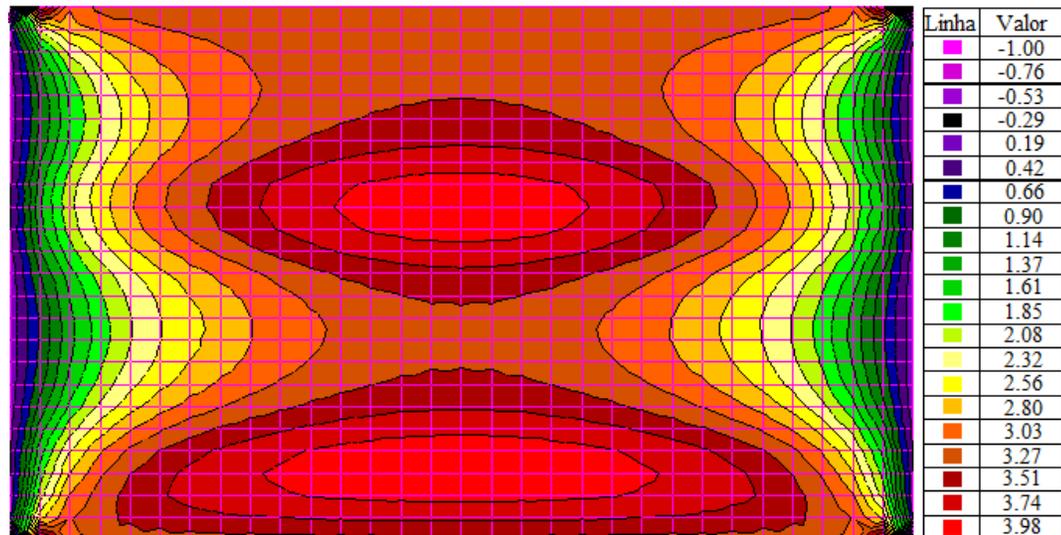


Figura 4. Tensões na face inferior da placa, com eixo de veículo passando a 20cm do bordo da placa, para um gradiente térmico de 20⁰C.

A Figura 5 e Figura 6 apresentam-se, respectivamente, o diagrama de tensões atuantes na direção x e y junto a face inferior da placa, proveniente de um veículo passando transversalmente ao eixo longitudinal da mesma.

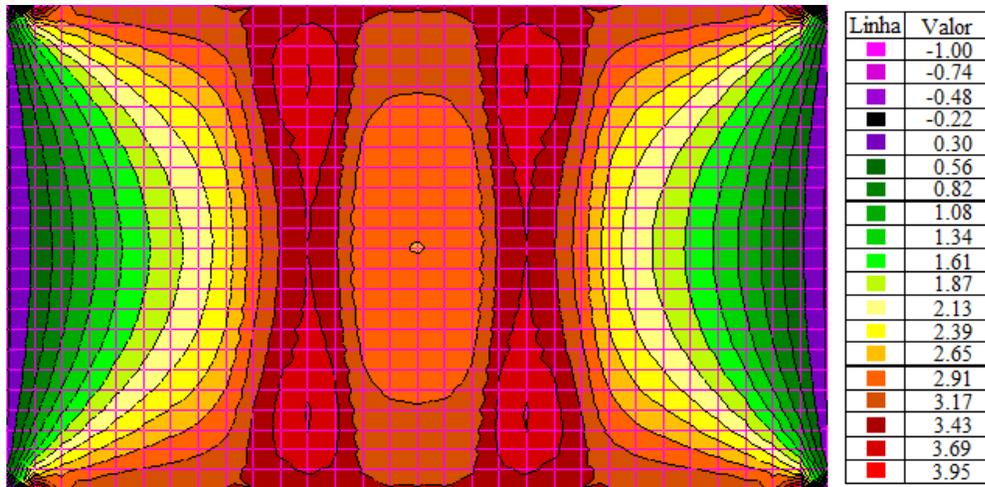


Figura 5. Tensões na face inferior da placa, com eixo de veículo passando transversalmente ao eixo longitudinal da placa (tensões em x), para um gradiente térmico de 20°C.

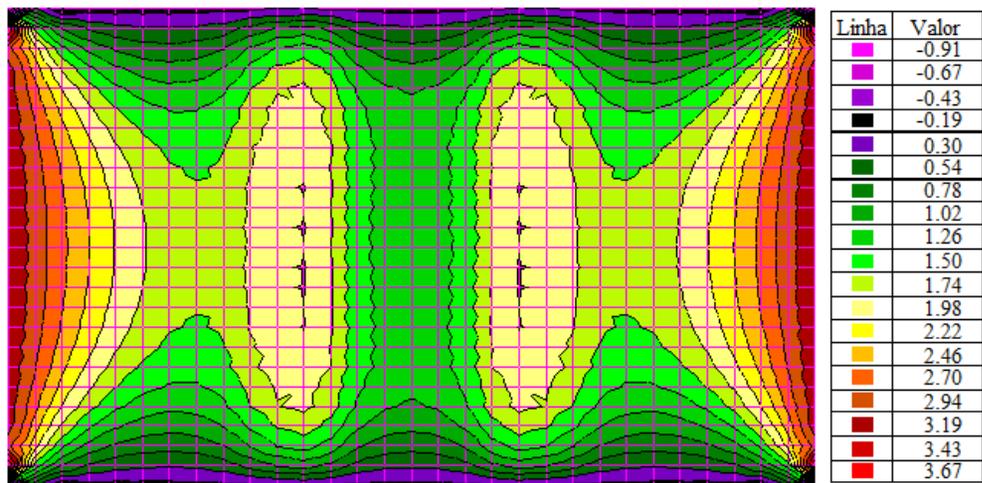


Figura 6. Tensões na face inferior da placa, com eixo de veículo passando transversalmente ao eixo longitudinal da placa (tensões em y), para um gradiente térmico de 20°C.

Para os demais diferenciais térmicos admitidos na análise destas placas (0°C, +5°C, +10°C e +15°C), um quadro resumo das tensões produzidas para cada posição do eixo é apresentado na Tabla 3. Ademais, é analisado o número máximo de repetições de carga admissíveis para cada posicionamento do eixo e diferencial térmico, conforme as correlações admitidas na Tabela 3. Verifica-se que, independente do posicionamento do eixo junto à placa, diferenciais térmicos pequenos admitem um número ilimitado de repetições de cargas. Entretanto, à medida que ocorre um incremento deste diferencial ocorre, exponencialmente, um declínio do número admissível de repetições de eixos passantes sobre a placa. Isto mostra a sensibilidade do modelo ao efeito térmico e, intuitivamente, das placas de concreto não armado com a geometria supramencionada. No modelo computacional adotado não foi possível simular diretamente a ligação entre placas

vizinhas, as quais são dadas, essencialmente, pelo atrito. Neste sentido, reforça-se que esta transferência de carga entre placas sem barras de transferência é muito variável, evidenciando-se diferentes transferências conforme a hora ou dia da estação climática, provendo, de fato, complexa tal simulação (Colim *et al.*, 2011).

Ao atingir a capacidade resistente da placa, ou seja, o limite de fadiga da peça, inevitavelmente há uma propagação de fissuras lineares na superfície do elemento, podendo provir no sentido longitudinal, transversal ou em ambos os sentidos (Oliveira e Correia, 2009). De fato, as fissuras de origem térmica observadas na superfície das placas de concreto tem magnitude proporcional à variação térmica na qual estes elementos foram submetidos durante a sua vida útil (Schindler e McCullough, 2002). Ademais, a própria temperatura no ato do lançamento do concreto influencia, igualmente, o seu desempenho frente ao tráfego e, por conseguinte, na sua vida útil (Schindler e McCullough, 2002). As fissuras deste cunho, geralmente são uniformemente espaçadas e perpendiculares à direção da tensão axial aplicada. (Bialas e Mróz, 2011).

Tabela 3. Número admissível de repetições de carga para as placas sob diferentes posicionamentos do eixo e diferenciais térmicos.

| Eixo 10t | Dimensões placa | Gradiente térmico (°C) | k (MPa/m) | Tensão atuante (MPa) | Relação tensões | Número admissível de repetições de carga |
|--|-----------------|------------------------|-----------|----------------------|-----------------|--|
| Passando no eixo (tensões em x) | 3,5x6,0x0,20m | 0 | 101 | 1,34 | 0,298 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 5 | 101 | 1,89 | 0,42 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 10 | 101 | 2,59 | 0,576 | 41.040 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 15 | 101 | 3,29 | 0,731 | 494 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 20 | 101 | 3,98 | 0,884 | zero |
| Passando a 20cm da borda (tensões em x) | 3,5x6,0x0,20m | 0 | 101 | 1,39 | 0,309 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 5 | 101 | 1,89 | 0,42 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 10 | 101 | 2,56 | 0,569 | 41.040 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 15 | 101 | 3,23 | 0,718 | 652 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 20 | 101 | 3,98 | 0,884 | zero |
| Passando transversalm. ao eixo (tensões em x) | 3,5x6,0x0,20m | 0 | 101 | 1,00 | 0,221 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 5 | 101 | 1,62 | 0,36 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 10 | 101 | 2,3 | 0,511 | 285.600 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 15 | 101 | 3,00 | 0,667 | 3.900 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 20 | 101 | 3,95 | 0,878 | zero |
| Passando transversalm. ao eixo (tensões em y) | 3,5x6,0x0,20m | 0 | 101 | 1,51 | 0,336 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 5 | 101 | 1,61 | 0,358 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 10 | 101 | 1,83 | 0,407 | Ilimitado |
| | 3,5x6,0x0,20m | 15 | 101 | 2,75 | 0,611 | 23.940 |
| | 3,5x6,0x0,20m | 20 | 101 | 3,67 | 0,816 | 80 |

5. CONCLUSÃO

Evidencia-se, portanto, que um dos prováveis fatores que desencadearam algumas das manifestações patológicas observadas na rodovia ERS-118 pode ser a própria geometria das placas de concreto constituintes. Esta geometria não se mostrou satisfatória quando aplicada a ação conjunta dos esforços de tração na flexão, proveniente da passagem do eixo dos veículos e do efeito térmico sob as placas.

Nas simulações estruturais realizadas neste trabalho constatou-se que as placas submetidas a variações térmicas altas admitem um número de eixos passantes muito limitado e são, intuitivamente, não condizentes com o volume de tráfego pesado que se observa diariamente na rodovia. Ademais, mais especificamente, placas submetidas a um gradiente térmico de 20⁰C produzem fissuração mesmo sem qualquer passagem de eixo de carga. Muitas trincas talvez não ocorreram por fadiga, portanto.

Para reduzir este fenômeno, as placas deveriam ter sido executadas com um dos seguintes diferenciais: (a) espessura maior; (b) menor comprimento ou (c) placas armadas. De fato a experiência tem demonstrado que, na região sul do Brasil, placas não armadas com comprimentos superiores a 5m são, atualmente, inexequíveis quando considerado o efeito térmico no dimensionamento.

Portanto, através da obtenção de um histórico do volume de tráfego, da extração de corpos de prova e do levantamento das temperaturas médias anuais, é possível avaliar em que momento da vida útil deste pavimento as fissuras surgiram.

6. ABREVIACÕES

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes do Brasil

7. CONCLUSÕES

Evidencia-se, portanto, que um dos prováveis fatores que desencadearam algumas das manifestações patológicas observadas na rodovia ERS-118 pode ser a própria geometria das placas de concreto constituintes. Esta geometria não se mostrou satisfatória quando aplicada a ação conjunta dos esforços de tração na flexão, proveniente da passagem do eixo dos veículos e do efeito térmico sob as placas.

Nas simulações estruturais realizadas neste trabalho constatou-se que as placas submetidas a variações térmicas altas admitem um número de eixos passantes muito limitado e são, intuitivamente, não condizentes com o volume de tráfego pesado que se observa diariamente na rodovia. Ademais, mais especificamente, placas submetidas a um gradiente térmico de 20⁰C produzem fissuração mesmo sem qualquer passagem de eixo de carga. Muitas trincas talvez não ocorreram por fadiga, portanto.

Para reduzir este fenômeno, as placas deveriam ter sido executadas com um dos seguintes diferenciais: (a) espessura maior; (b) menor comprimento ou (c) placas armadas. De fato a experiência tem demonstrado que, na região sul do Brasil, placas não armadas com comprimentos superiores a 5m são, atualmente, inexequíveis quando considerado o efeito térmico no dimensionamento.

Portanto, através da obtenção de um histórico do volume de tráfego, da extração de corpos de prova e do levantamento das temperaturas médias anuais, é possível avaliar em que momento da vida útil deste pavimento as fissuras surgiram.

8. REFERENCIAS

- Ashtakala, B.; Poorooshab; H.B (1989). “*Prediction of tensile cracks in road pavements*”. In: Mathematical and Computer Modeling. Volume 12, Issue 1, p. 55–60.
- Balbo J. T. (1989), “*Aplicação do método dos elementos finitos na avaliação estrutural de pavimentos rígidos rodoviários*”. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Balbo J. T. (1996), “*Practical considerations for concrete pavement design based on numerical model*”. In: 1er Congreso Interamericano de Pavimentos Rígidos, Buenos Aires: Argentina.
- Balbo J. T. (2009), “*Pavimentos de Concreto*”. São Paulo, Brasil.
- Bialas, M.; Mróz, Z. (2006). “*Crack patterns in thin layers under temperature loading Part II: Cyclic loading*”. In: Engineering Fracture Mechanics. Volume 73, Issue 7. p. 939-952.
- Colim, G.; Balbo, J.T.; Khazanovich, L (2011). “*Effects of temperature changes on load transfer in plain concrete pavement joints*”. In: Revista IBRACON Estruturas e Materiais, V.4, p. 405-437.
- Colley, B.E.; Humphrey, H.A (1966). “*Entrosagem de Agregados em Juntas de Pavimentação de Concreto de Cimento Portland*”. In: 2º Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.
- DNIT IPR-714 (2005) *Manual de Pavimentos Rígidos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Helene, P. (2007), “*Rehabilitación y Mantenimiento das Estructuras de Concreto*”. São Paulo, Brasil.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. (2005). “*Mecânica dos pavimentos*”. Rio de Janeiro: Brasil.
- NBR 6118 (2014), “*Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT*”. Rio de Janeiro, Brasil.
- Oliveira, H.; Correia, P.L (2009). “*Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamics thresholding*”. Proc. European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland.
- Schindler, A. K.; McCullough, B.F (2002). “*The Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions*”. University of Texas at Austin. Washington.
- Senço, W. (1997), “*Manual de Técnicas de Pavimentação*”. São Paulo, Brasil.
- Severi, A. A. (2002), “*Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical*”. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.