

Effects of temperature changes on load transfer in plain concrete pavement joints

Efeito das variações de temperatura na transferência de cargas em juntas de pavimentos de concreto



G. M. COLIM^a
glendacolim@gmail.com

J. T. BALBO^b
jotbalbo@usp.br

L. KHAZANOVICH^c
khaza001@umn.edu

Abstract

A field investigation of load-induced deflections using a FWD device allowed evaluating the joint behavior of plain jointed concrete pavements regarding its load transfer efficiency (LTE) at joints. Such parameter, at non dowelled joints, present a large variation along day hours as well as along the seasons (winter and summer); while dowelled joints disclosed little variation for LTE with values ranging from 90 to 100%, non dowelled joints have reduced transfer efficiency between 50% (winter) to 60% (summer). Using FEM-based software it was allowed to estimate very similar values, matching the field data, confirming the requirements for considering LTE behavior at joints during structural analysis and design of concrete pavements.

Keywords: joints; plain concrete pavements; load transfer.

Resumo

Medidas de deflexões com o falling weight deflectometer permitiram a avaliação do comportamento de juntas em pavimentos de concreto simples do ponto de vista de sua eficiência de transferência de cargas (LTE). As investigações mostraram importantes variações nesse parâmetro, quando não há dispositivos de transferência de cargas, entre horários de dias bem como entre estações climáticas distintas (inverno e verão); enquanto que juntas com barras de transferência apresentam, pouca variação nesse parâmetro e encontrando-se em geral entre 90 e 100% de capacidade de transferência, quando há quedas de temperatura, as juntas sem barras chegam a apresentar capacidade de transferência reduzida para 50% no inverno e para 60% no verão. Valores estimados de transferência de carga com um programa de elementos finitos permitiram confirmar a necessidade de tratamento teórico do problema em fases de análise estrutural e projetos de pavimentos de concreto com juntas.

Palavras-chave: juntas; pavimentos de concreto simples; transferência de carga.

^a Rua Bogotá, nº 148 – Setor Anhanguera, Araguaína – TO - CEP: 74.817-510

^b Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, jotbalbo@usp.br, Av. Prof. Almeida Prado 83, travessa 2, CEP 05516-000, Cidade Universitária, São Paulo, Brazil.

^c University of Minnesota at Twin Cities, Department of Civil Engineering, 500 Pillsbury Drive S.E., Minneapolis, 55455-0116, USA.

1. Introdução

Quase todos os tipos de pavimentos de concreto em sistemas de placas possuem juntas, sendo exceção os pavimentos com armadura contínua, cujas juntas, quando ocorrem, são apenas construtivas (frias). Além disso, as fissuras de contração podem ser encaradas também como juntas. As juntas são transversais e longitudinais, sendo que em ambos os casos ocorrem transferências de cargas entre placas laterais ou sucessivas quando uma carga se aproxima dessa junta, havendo ou não elemento de transmissão de esforços. Nas juntas podem existir barras de transferência de carga ou barras de ligação, sendo que, na ausência de ambas, ainda assim ocorre transferência de cargas por efeito do intertravamento entre agregados em especial quando a junta é de contração. Nas juntas de construção, ou mesmo entre placas pré-moldadas, em escala igual ou menor, ocorre também esse mecanismo de atrito e cisalhamento nas faces verticais contíguas do concreto (Figura [1]).

A consideração dos efeitos de transferência de cargas nas juntas de pavimentos de concreto é aspecto primordial em projetos e análises estruturais desses pavimentos, sejam novos pavimentos ou em fase de restauração de antigos pavimentos. Por meio desses efeitos é que as tensões horizontais impostas no sistema estrutural, nas proximidades dessas juntas, podem ser bastante reduzidas, o que é fato positivo na determinação de resistências de projeto para o concreto, taxas de armadura e de espessuras de placas e de reforços estruturais. Sabe-se que a menor ou maior eficiência na transferência de cargas é dependente da temperatura do sistema (abertura de juntas), da reação de suporte do sistema de apoio da placa e do tipo de junta (de contração, com ou sem barra de transferência de carga, de construção, de expansão). A efetiva medida dos efeitos de transferência de cargas pode ser realizada, experimentalmente, por meio de duas técnicas. Na primeira delas, o pavimento é instrumentado com *strain gages* e células de cargas que permitem medir deformações no concre-

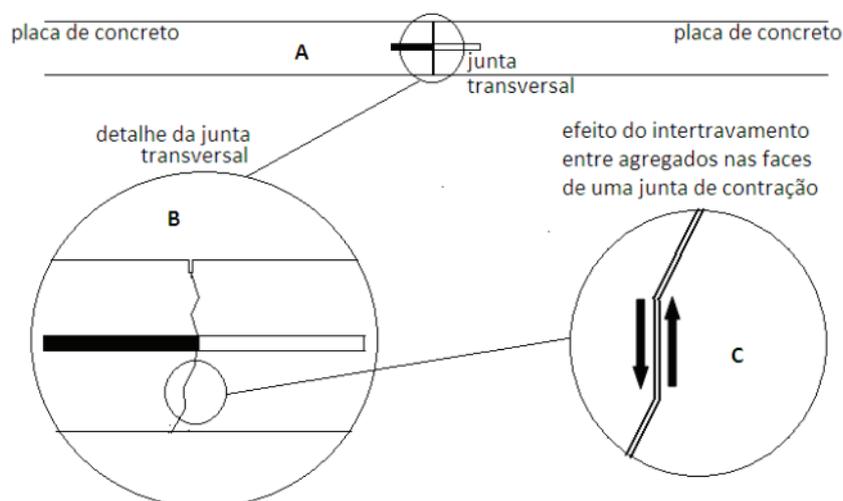
to e pressões sobre camadas inferiores, ao se aproximar uma carga em movimento de uma junta; todavia, este procedimento é dispendioso, o que leva a considerar a técnica alternativa. Podem ser medidas as deformações verticais sobre a superfície do concreto (deflexões), em duas posições opostas, ortogonalmente e igualmente afastadas da junta, quando a carga é aplicada em uma das posições [1]. Com a transferência de cargas atuando, a placa descarregada desloca-se d_2 de modo mais ou menos sólido ao deslocamento d_1 da placa carregada, permitindo assim a determinação de um parâmetro arbitrariamente denominado por eficiência de transferência de carga (a partir do inglês *load transfer efficiency* – LTE), conforme a equação [1]:

$$LTE = \frac{\delta_2}{\delta_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

Conforme a equação [1], se a transferência de carga for nula, a deflexão na placa descarregada é também nula, sendo que, nesse caso, apenas a placa carregada sofre deformação. Quando LTE atinge 100%, a transferência de carga é máxima, de tal sorte que as deformações verticais em ambas as placas devem ser idênticas. Ao se considerar que a resposta da estrutura na junta não deveria ser dependente apenas dos elementos de transferência mencionados anteriormente, mesmo que as juntas estivessem totalmente sem contato, em toda a profundidade da placa, alguma transferência se daria pelas camadas inferiores [2], sendo por se supor assim que os valores extremos de LTE requereriam uma grande distância entre as faces das juntas, o que seria mais palpável no caso de juntas de expansão.

Com base nos conceitos expostos é de se esperar que LTE afete o desempenho de pavimentos de concreto, bem como possa sofrer alterações sazonais e ao longo do tempo. Segundo a *American Concrete Pavement Association* [3] para que a transferência de

Figura 1 – Barra de transferência e faces do concreto intertravadas



carga proporcionada por uma junta seja considerada adequada, o valor de LTE não deve ser inferior a 75%. Métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto simples adotados correntemente no país, como aquele da Prefeitura do Município de São Paulo [4], ou seja, um método oficial, e a diretriz da *Portland Cement Association* [5], um método não oficial, não consideram explicitamente o valor do LTE e muito menos suas nuances sazonais. Assim, valores de tensões determinadas no projeto podem se distanciar da realidade de campo, onde o LTE varia conforme condições climáticas às quais os pavimentos ficam expostos. Em não existindo estudos dessa natureza em clima tropical úmido é fundamental que alguma pesquisa seja realizada para estabelecer padrões de transferência de carga em juntas transversais de pavimentos de concreto simples. Trabalhos desta natureza possibilitarão a atualização e melhoria dos métodos de dimensionamento para consideração das variações de LTE ao longo do horizonte de projeto, o que significa admitir respostas estruturais diferenciadas dos pavimentos ao longo do tempo, o que é fato inexorável. Procura-se nesse artigo descrever experimentos realizados buscando caracterizar os valores de LTE em diferentes condições climáticas, tendo-se em conta ainda o efeito da presença de bases cimentadas e granulares nos pavimentos de concreto simples estudados, em juntas de contração, com e sem barras de transferência de carga.

2. Principais aspectos sobre transferência de cargas

O primeiro registro do emprego de barras de transferência de cargas é do ano de 1918, em pavimento de concreto simples em *Newport News*, no Estado de Virgínia [3]. Já Friberg [6] indicava que as barras de transferência de carga deveriam ser de aço liso com comprimento de 600 mm e seção circular de diâmetro de 19 ou 22 mm na maioria das rodovias; deveriam estar espaçadas de 300 a 500 mm sendo que metade da barra deveria ser engraxada para não aderir ao concreto. Entretanto, até as décadas de 1970 e 1980, muitas rodovias e corredores foram construídos sem barras de transferência de cargas, em muitos países, incluindo os EUA, sendo que isso era incomum na Europa; como consequência dessa técnica, na maioria das vezes observou-se o surgimento de escalonamentos em juntas transversais com subsequente quebra de bordas desniveladas (esborcinamentos), prejudicando bastante o conforto dos usuários. Sobre isso, afirma Khazanovich [7]: “*O desempenho de muitos pavimentos de concreto com juntas não foi, historicamente, interpretado por sua capacidade estrutural, mas preferencialmente pelo seu sistema de juntas... Valores médios de eficiência de transferência de carga conduzem à ocorrência de fissuras longitudinais e de canto, além de expressivo escalonamento nas juntas. Esses defeitos podem levar à presença de irregularidade e pobres condições de rolamento*”.

Em enquete conduzida na América do Norte [7] verificou-se que apenas entre as décadas de 1970 e 1990 quase a totalidade de estados e províncias passaram obrigatoriamente a construir pavimentos de concreto com barras de transferência de cargas. Observa-se que, mesmo nos EUA, o processo de entendimento da necessidade de barras de transferência de carga em juntas para a melhoria do desempenho em longo prazo dos pavimentos de concreto, remonta a cerca de duas a três décadas atrás. Fica clara então a dicotomia técnica existente em relação a tradicionais usuários de pavimentos de concreto, como Alemanha, Áustria e

Suíça, onde desde a década de 1930 não se dispensava o uso de barras de transferência de cargas em rodovias [8]. Em estudo recente em laboratório [9] foram realizados ensaios para estudar o comportamento estrutural de juntas transversais em placas de concreto simples com dimensões reduzidas em relação a pavimentos convencionais; a espessura das placas de concreto variou bem como o carregamento imposto, além de serem testados vários dispositivos de transferência de cargas. Os resultados permitiram observar que o uso de BT em pavimentos de concreto torna a transferência de carga significativamente maior do que no caso de ausência de dispositivo de transferência de carga. Evidentemente, isso afeta o desempenho dos pavimentos de concreto em serviço.

2.1 Medidas de Transferência de Carga em Juntas

Khazanovich e Gottif [10] afirmam que medidas de transferência de carga em juntas para as pesquisas do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) apontaram valores de LTE menores que 20% e também próximos de 100%. As medidas foram executadas também em fissuras nas placas, procurando entender os efeitos desses danos em uma mesma placa por meio da transferência de carga verificada. Concluíram que cerca de 10% das juntas apresentavam LTE inferior a 50% enquanto que a grande maioria das fissuras resultava em LTE calculados acima de 85%.

Para uma investigação da influência da resistência do solo de fundação na eficiência e durabilidade de transferência de carga, Colley e Humphrey [11] utilizaram três tipos de subleito em seu estudo: argila, pedregulho e uma base tratada com cimento. Com uma abertura na junta de 0,89 mm e sobre subleito de argila, comparando-se duas placas de espessuras diferentes (180 e 280 mm), a eficiência de transferência de carga foi de 5% para a mais delgada e 29% para a placa mais espessa. É evidente que a rigidez da placa mais espessa contribuiu para a resistência do pavimento sobre esse tipo de subleito. Sobre a base granular, a eficiência saltou para 9% e 50%, respectivamente. E aumentou ainda mais sobre base tratada com cimento. Concluíram também que, quanto maior a abertura das juntas, menor a eficiência de transferência de cargas do sistema.

Vandenbossche [12] verificou que a eficiência de transferência de carga em placas de pavimento de concreto simples novo sem BT nas juntas pode variar entre 70 e 100%. O LTE em pavimentos novos com BT varia entre 80 e 100%. A *Federal Highway Administration* [13] recomenda que a restauração do pavimento de concreto, para prevenir futuros danos, deva ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições: escalonamento na junta ou fissuras de 3 mm ou mais; LTE menor que 70%; diferença entre a deflexão na placa carregada e na placa descarregada maior que 0,25 mm; e acúmulo de escalonamento nas juntas e nas fissuras acima de 525 mm/km de extensão.

2.2 Temperatura e Abertura de Juntas

Shahin [1], com base em medidas de LTE em juntas de pavimentos de concreto simples em aeroportos nos EUA, propõe que a transferência de carga em juntas seja corrigida conforme a temperatura ou horário do dia, pois os valores de LTE que ocorrem no início da manhã são menores que aqueles verificados no fim do dia devido à expansão do concreto no período. Para que seja realizada esta correção no valor do LTE (conhecido apenas um valor

Tabela 1 – Características das seções em pavimento de concreto na USP

Seção	Placa	Comprimento (m)	Espessura da placa (mm)	Tipo de base	Espessura da base (mm)	Barras de transferência
A	A1	4,00	150	BGS	200	Em ambas as juntas
	A2	5,50	150	BGS	200	
	A3	7,50	150	BGS	200	
B	B1	4,00	150	CCR	200	Em ambas as juntas
	B2	5,50	150	CCR	200	
	B3	7,50	150	CCR	200	
C	C1	4,00	250	CCR	100	Em ambas as juntas
	C2	5,50	250	CCR	100	
	C3	7,50	250	CCR	100	
D	D1	4,00	250	BGS	100	Em ambas as juntas
	D2	5,50	250	BGS	100	
	D3	7,50	250	BGS	100	
E	E1	5,50	250	BGS	100	Apenas entre as placas E1 e E2
	E2	5,50	250	BGS	100	
	E3	5,50	250	BGS	100	

de LTE se torna possível a determinação de LTE para qualquer outro horário do dia), propõe a utilização da seguinte função com o fator de correção (F):

$$LTE = \frac{\delta_2}{\delta_1} \times (1 + F) \times 100 [\%] \quad (2)$$

Tal fator de correção é dado graficamente para determinados períodos de medidas nos pavimentos. Tal modelo indica decréscimo de F entre 8h e 14h, sendo que após esse período F é nulo, para o horário de referência de 14h. A determinação de LTE para o horário de 14h é realizada pela equação [2] com base na medida de LTE para um horário qualquer, se determinando o fator de correção para o esse horário de medida. Os valores de F encontram-se calibrados com base em medições de campo nas condições prevalentes no nordeste dos EUA (clima temperado).

A temperatura do concreto, resultando em sua expansão ou contração, interfere na abertura da junta ao longo da vida de serviço do pavimento. A eficiência de transferência de carga é drasticamente reduzida com o aumento da abertura da junta [14]. Por esta razão, a abertura da junta deve ser a menor possível, o que barras de transferência e mais efetivamente, armaduras em pavimentos com armadura contínua, podem controlar de maneira mais efetiva. Um estudo para entender o efeito das diferentes características do pavimento de concreto em relação a abertura de juntas, empregou doze seções-teste construídas em Chillicothe, Ohio, com

vários comprimentos de placas, tipos de bases, tipos de barras de transferência de carga e modos de serragem das juntas [15]. O pavimento possuía duas faixas de 3,6 m de largura e espessura de 230 mm da placa de CCP. Para as bases foram utilizados tanto materiais granulares quanto estabilizados com cimento. No estudo observou-se que o máximo movimento horizontal de placas de concreto ocorreu nos meses em que a temperatura variou amplamente entre o dia e a noite, tendo sido relacionadas a temperatura no concreto com os deslocamentos horizontais nas placas. O estudo mostrou que o máximo movimento (abertura) ocorre em meses mais frios. Isto é um evidência que o LTE em baixas temperaturas é menor devido à contração do concreto. Verificou-se ainda que o tipo de base, fosse ela granular ou estabilizada com cimento, não afetou a abertura da junta, o que é fato importante para análises estruturais. Isto é indicativo de que o emprego de bases como CCR (concreto compactado com rolo) ou BGC (brita graduada tratada com cimento) não restringiria o movimento das placas de modo diferente de BGS (brita graduada simples) ou outras bases granulares.

Khazanovich e Gotlif [10] estudaram dados a partir de inúmeras seções de rodovias dentro do programa LTPP/NHCPR, incluindo medidas de aberturas de juntas em diferentes horas do dia e estações do ano, que não ultrapassavam 2 mm, consideradas todas as seções de rodovias.

Para Vandenbossche [12] a LTE em juntas sem BT pode diminuir em mais 50% quando a abertura for maior que 0,9 mm. Indica a autora que com testes empregando *falling weight deflectometer* (FWD) valores de LTE resultaram em 50% pela manhã e 90% à

tarde. Greer [16] também obteve resultados indicando mudança de 16 para 84% os valores de LTE em placas sem BT, conforme alterações de temperatura entre semanas de inverno e verão. Essas alterações não foram significativas quando houve dispositivo de transferência de carga (BT) na junta da placa de concreto simples. Em uma pesquisa no Japão [17] foi desenvolvido um modelo relacional entre LTE e a abertura da junta para pavimentos com e sem BT. Observaram os autores que, no caso de presença de BT, a abertura possui pouca interferência no valor de LTE quando comparada ao caso de pavimentos de concreto sem BT. Com BT o valor de LTE diminui em função da abertura da junta, tendendo assintoticamente ao valor mínimo de 80%. Verificou-se ainda que para placas sem BT o valor de LTE cai linearmente em função da abertura da junta, tendendo a zero para uma abertura em torno de 4 mm.

No âmbito da PCA [11] foram realizadas análises em campo e em laboratório para avaliar a eficiência e durabilidade da transferência de carga devido ao entrosamento dos agregados nas faces fissuradas. Foram então consideradas as variáveis: abertura da junta, resistência da fundação, nível de carga e espessura da placa. Dois tipos de agregados foram empregados para os concretos: seixo rolado muito arredondado e pedra britada com arestas vivas. Em relação à abertura das juntas, que variou de 0,5 a 2 mm, verificou-se que quanto maior a abertura da junta menor sua eficiência em transferir carga.

Poblete *et al.* [18] determinaram que a máxima diferença entre abertura da junta no topo da placa e no fundo encontrada em um pavimento de concreto simples no Chile foi de 0,15 mm, em pavimentos sem BT. Pittman [19] observou que a largura da abertura da junta na superfície era estatisticamente igual no fundo da fissura.

2.3 Efeitos do sistema de reação para apoio da placa

Quanto aos efeitos do módulo de reação do subleito (k) nas placas de concreto, modelos analíticos como aquele de Westergaard [20] e numéricos, como aquele de Balbo [21], ambos empregando o conceito de fundação de Winkler, mostraram que variações desse parâmetro nas tensões em placas de concreto é muito pequeno. Contudo, trabalhos como de Spangler [22] com base em pista experimental mostram com clareza que há diferenças entre este

conceito de reação do subleito quando uma carga é aplicada na borda ou no centro de uma placa. Shahin [1] em suas análises empregou o método dos elementos finitos para simulações de cargas aplicadas no canto de placas de concreto, determinando valores de LTE em função do módulo de reação do subleito (k) e das deflexões máximas obtidas sobre as placas avaliadas, em um processo de retroanálise. Os resultados deram claras indicações de que para um mesmo valor de deflexão, quanto menor o valor do módulo de reação do subleito (k) maior a transferência de carga (maior LTE). Em outras palavras, os parâmetros descritores da transferência de carga nas juntas e do padrão de deformabilidade elástica das camadas de suporte trabalhariam conjuntamente na definição das deflexões impostas pelo carregamento externo.

Zollinger [23] apresentou resultados de um experimento em pavimentos de concreto simples com diferentes espessuras de placas de concreto (de 200 a 360 mm) com objetivo de analisar a abertura da junta na placa de concreto em função do módulo de reação do subleito. Os resultados indicaram que para um mesmo valor de módulo de reação do subleito (k), quanto maior a espessura da placa de concreto maior deveria ser a abertura da junta para uma mesma deflexão. Esses resultados reforçam a hipótese de que os parâmetros estruturais trabalham conjuntamente e são de difícil individualização em uma avaliação, pois, combinações de valores diferentes podem resultar em efeitos idênticos.

3. Testes de transferência de cargas em pista experimental

As análises em placas de concreto de verdadeira grandeza, quanto à transferência de carga em juntas, foram realizadas no pavimento experimental existente no campus da USP em São Paulo. Na sequência são apresentados os detalhes dos estudos.

3.1 Medidas de deflexões na pista experimental

A pista com pavimentos de concreto simples experimentais na USP possui cinco seções com diferentes características estruturais para as placas de concreto conforme indicadas na Tabela [1]. Nas juntas com barras de transferência de carga, estão espaçadas entre si de 300 mm, possuem diâmetro de 32 mm (CA-25) e comprimento de 400 mm. As bases dos pavimentos são constitu-

Figura 2 – Testes com FWD com posicionamento de carga em juntas



Tabela 2 – Medidas com FWD realizadas

Época	Data	Horário	Carga nos centros	Carga nas juntas	Objetivos e usos
Inverno 2006	28/07/2006	manhã	✓	✓	Módulo de elasticidade do concreto Módulo de reação do subleito no centro e em juntas LTE
		tarde	-	✓	Módulo de reação do subleito no centro e em juntas LTE
Verão 2007	26/03/2007	tarde	-	✓	Módulo de reação do subleito no centro e em juntas LTE
		noite	-	✓	Módulo de reação do subleito no centro e em juntas LTE

idas por brita graduada simples (BGS) ou por concreto compactado com rolo (CCR), todas sobre uma área com solo de subleito argiloso e muito homogêneo [24].

Os testes com FWD (Figura [2]) foram realizados conforme descritos na Tabela [2], com o objetivo de englobar duas estações climáticas distintas em São Paulo: inverno (brando) e verão. Foram realizadas medidas de deflexões com sete sensores (geofones), um deles sob a placa de aplicação de carga; esta placa possui 300 mm de diâmetro. As temperaturas de topo e os valores de diferenças térmicos entre topo e fundo de placa (calculados de acordo com modelo empírico definido na própria pista experimental [24]) são apresentados nas Tabelas [3] e [4]. As aplicações de carga sobre o pavimento de concreto foram realizadas com três níveis de carga (aproximadamente 47, 74 e 84 kN) para avaliar-se o efeito do carregamento nos parâmetros estruturais dos pavimentos, sendo aplicadas duas vezes cada carga para confirmação dos resultados. O posicionamento da carga do FWD foi a 150 mm das juntas o que garantia a medida das deflexões nessa posição como também no terceiro geofone, afastado de 300 mm do centro de aplicação de carga; assim, d_1 e d_3 foram empregados para o cálculo do LTE.

3.2 Estimativa inicial de parâmetros estruturais antes da retroanálise pelo MEF

De maneira a se obter valores estimativos de partida (sementes) para os parâmetros a serem retroanalisados, empregou-se o critério proposto por Hall [25], no qual se determina o raio de rigidez relativa da placa com base na área da bacia de deflexões (AREA) conforme preconiza a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO [26]). Este parâmetro é definido como se segue:

$$AREA = 6 \times \left[1 + 2 \times \left(\frac{d_{30}}{d_0} \right) + 2 \times \left(\frac{d_{65}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{90}}{d_0} \right) \right] \quad (3)$$

As deflexões d_0 , d_{30} , d_{65} e d_{90} são dadas em polegadas. Com o valor de AREA, estima-se o raio de rigidez relativa (l_k) por meio da equação:

$$l_k = \left[\frac{\ln \left(\frac{36 - AREA}{1812,279133} \right)}{-2,559340} \right]^{4,387009} \quad (4)$$

Para uma placa semi-infinita, com carregamento em sua região central, é possível a determinação analítica do módulo de reação do subleito (k) uma vez conhecido o raio de rigidez relativa do sistema, conforme proposto por Westergaard [20]:

$$k = \frac{P}{8 \times d_0 \times l_k^2} \times \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) \times \left[\ln \left(\frac{a}{2l_k} \right) + \gamma - 1,25 \right] \times \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

Sendo k dado em libras por polegada cúbica, P a carga aplicada (em libras-força), d_0 a deflexão máxima no centro da placa (em polegadas), l_k o raio de rigidez relativa determinado pela equação [4] (em polegadas) e a o raio da carga circular aplicada pelo FWD

(em polegadas). Conhecido os valores do raio de rigidez relativa e do módulo de reação do subleito, o valor do módulo de elasticidade da placa de concreto (E) é calculado pela equação para determinação de ℓ_k , conforme Westergaard [20]:

$$E = \frac{12 \times k \times \ell_k^4 (1 - \mu^2)}{h^3} \quad (6)$$

onde μ é o coeficiente de Poisson do concreto e h a espessura da placa de concreto.

3.3 Procedimentos de retroanálise das bacias de deflexões pelo MEF

As retroanálises das deformadas medidas na pista experimental foram realizadas empregando-se o programa de elementos finitos para placas ISLAB2000 que permite simulações numéricas das provas de carga realizadas em campo, ensejando a avaliação do módulo de elasticidade do concreto, do módulo de reação do subleito e do parâmetro LTE para as condições reais de campo

[27; 28]. Para a realização dessas retroanálises foram requeridas 27.786 simulações de parâmetros estruturais dos pavimentos de concreto estudados (14.826 para carga de centro e 12.960 para carga na junta da placa). Na Figura [3] é apresentado um caso de simulação do referido programa para juntas sem BT, representada a malha de elementos finitos para as três placas sucessivas de uma seção da pista experimental.

Após a estimativa de valores dos parâmetros E e k pelo critério anteriormente apresentado [25], foram fixados como extremos de uma faixa de variação para as tentativas de retroanálise, para tais parâmetros, um valor redondo abaixo da menor estimativa e outro valor redondo acima da maior estimativa para o parâmetro em questão. Dentro dessas faixas para as combinações de parâmetros foram realizadas as simulações, incrementando-se os valores e combinando-os, com o objetivo de se simular bacias de deflexões e compará-las com as bacias medidas em campo. Na Figura [4] é exemplificado um resultado de retroanálise dos valores de E e k que sistematiza a melhor bacia de deflexões teórica encontrada para as medidas de campo obtidas com carga do FWD sobre o centro da placa A2. O critério de aproximação e aceitação entre a bacia de deflexões retroanalisada e aquela medida em campo baseou-se no cálculo do erro quadrático

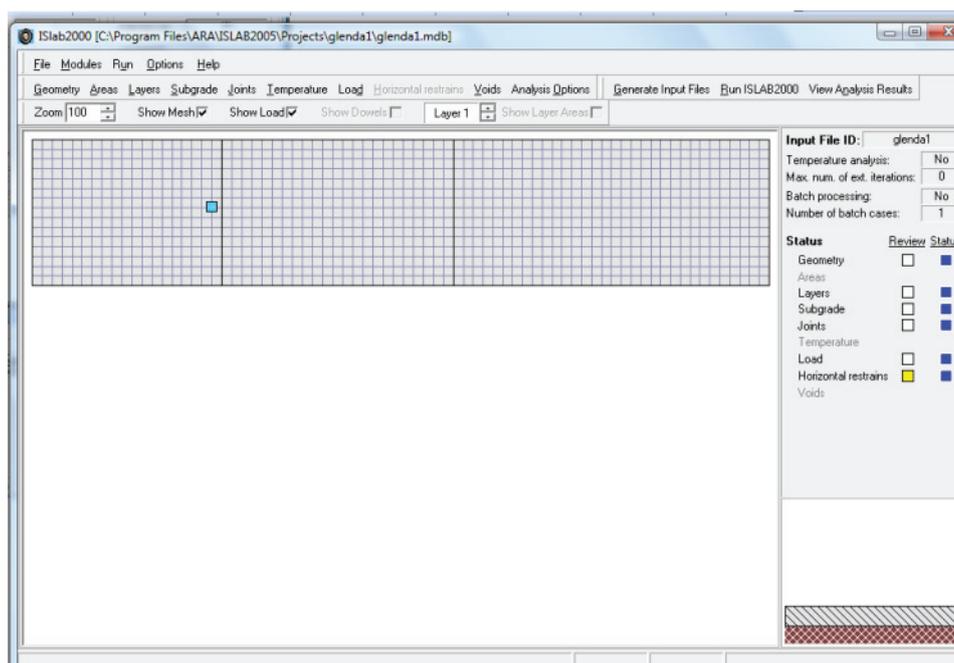
Tabela 3 – Diferencial térmico nas placas do pavimento de concreto (centros)

Seção	Posição FWD	Horário	Temperatura (°C)	Diferencial Térmico (ΔT em °C)
A	A1	9h25	20,0	3,7
	A2	9h45	21,0	4,2
B	B1	9h50	19,5	3,4
	B2	9h57	19,0	3,2
	B3	10h31	23,5	5,4
C	C1	10h00	20,0	3,7
	C2	10h06	21,0	4,2
	C3	10h40	22,0	4,7
D	D1	10h08	22,5	5,0
	D2	10h12	23,0	5,2
	D3	10h50	24,0	5,7
E	E1	10h16	28,0	7,8
	E2	10h25	25,0	6,2
	E3	11h03	25,5	6,5

Tabela 4 - Diferencial térmico (°C) nas placas do pavimento de concreto (juntas)

Seção	Posição	Inverno - 28/07/2006						Verão - 26/03/2007					
		Manhã			Tarde			Tarde			Noite		
		Horário	T _{topo}	DT	Horário	T _{topo}	DT	Horário	T _{topo}	DT	Horário	T _{topo}	DT
A	A1/A2	9h32	20,0	3,8	13h35	27,0	7,4	12h30	25,0	0,3	19h35	25,5	0,5
	A2/A3	10h27	24,0	5,9	14h05	34,0	11,0	13h02	26,0	0,8	18h47	28,0	1,9
B	B1/B2	9h54	19,5	3,6	13h47	26,0	6,9	12h35	24,5	0,0	18h20	28,5	2,2
	B2/B3	10h36	24,0	5,9	14h09	34,0	11,0	13h12	31,0	3,5	18h52	26,5	1,1
C	C1/C2	10h02	20,0	4,0	13h50	32,0	10,1	12h42	41,0	12,6	18h30	32,0	7,8
	C2/C3	10h46	22,5	5,2	14h12	29,0	8,6	13h20	38,5	11,3	19h00	28,0	5,6
D	D1/D2	10h10	23,0	5,5	13h58	34,0	11,1	12h50	43,0	13,7	18h34	32,5	8,0
	D2/D3	10h55	24,0	6,0	14h14	31,0	9,6	13h30	44,5	14,5	19h04	30,5	7,0
E	E1/E2	10h20	27,0	7,5	14h00	34,0	11,1	12h56	45,0	14,8	18h42	33,0	8,3
	E2/E3	11h00	25,0	6,5	14h16	35,0	11,6	13h40	46,0	15,4	19h12	30,5	7,0

Figura 3 - Malha de elementos finitos para simulação da carga em junta sem BT com ISLAB2000



entre as deflexões individuais de ambas as bacias, conforme a expressão:

$$ERRO = \sum_1^7 (\delta_{medida} - \delta_{ISLAB})^2 \quad (7)$$

O menor erro quadrático da série de simulações indica a bacia teórica que mais se aproximou das medidas reais em pista. Esse processo foi realizado por aproximações sucessivas com o estreitamento da faixa de valores de parâmetros a cada conjunto de simulações. Tais procedimentos e critérios acima mencionados foram também empregados para as retroanálises de bacias de deflexões medidas nas proximidades das juntas das placas de concreto. Nesses casos empregaram-se os valores previamente retroanalisados de módulo de elasticidade do concreto (para o centro das placas), restando ao fim do processo a determinação, por retroanálise, dos valores do módulo de reação do subleito nas bordas transversais (k_b) e dos valores de eficiência de transferência de cargas em juntas (LTE).

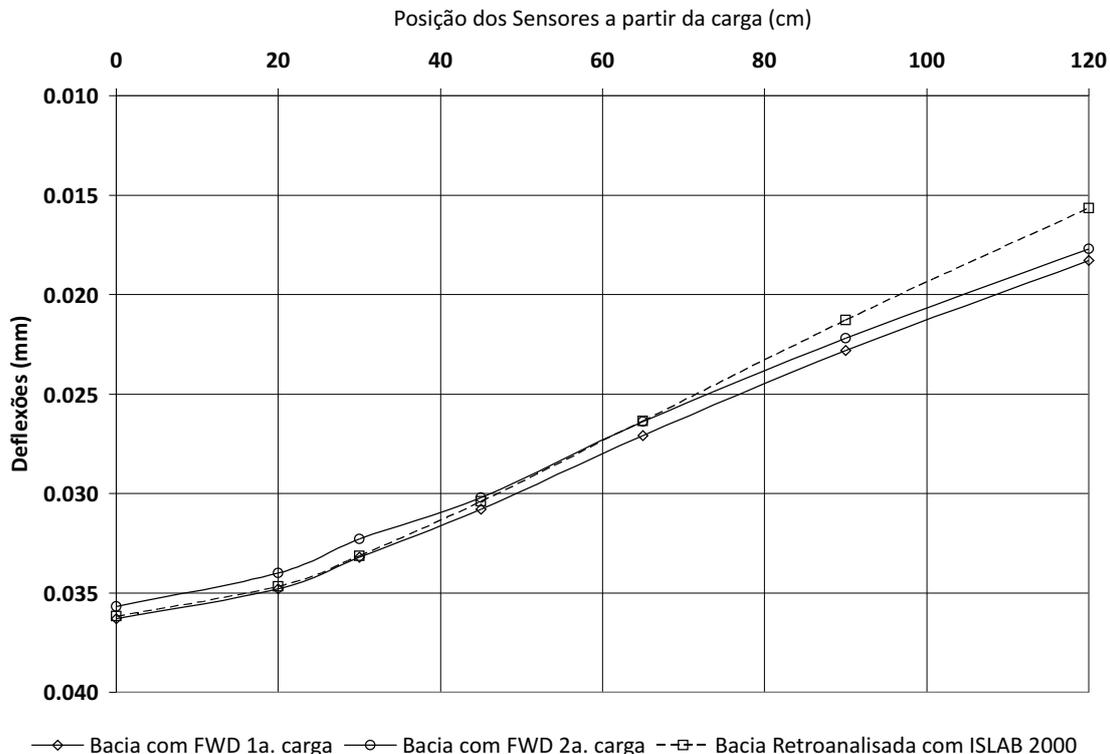
4. Resultados obtidos e sua análise

Os valores de LTE foram calculados conforme a equação [1] sendo os mesmos apresentados individualmente para cada carga-

mento na Tabela [5]. De tais valores individuais se extrai claramente que a presença de BT nas juntas transversais resulta em acréscimo expressivo no valor do LTE em comparação ao caso de juntas sem BT quando a transferência de carga se faz exclusivamente pelo intertravamento entre faces ou agregados (comparar posições quaisquer com a posição E3). Isto ressalta o fato de pavimentos de concreto com BT apresentarem melhor desempenho, o que se explica pelos estados de tensões mais aliviados decorrentes da presença de BT em juntas quando a carga solicita o pavimento nessa posição [7].

Um aspecto importante a ser extraído dos resultados apresentados na Tabela [5] é que existe um acréscimo para valores de LTE calculados em placas sem BT (placa E3) em função do incremento de carga, para o verão. Já em placas com BT não existe diferença significativa para esses valores de LTE em diferentes níveis de carregamento, tanto no inverno quanto no verão. Isto não significa que as deflexões não se alterem com o incremento de carga. Com base em tal constatação, as análises que se seguem são realizadas a partir dos valores médios de todas as medidas para as cargas aplicadas, conforme apresentados na Tabela [6]. Em todas as juntas das placas, com exceção da junta E3 que não possui BT, a transferência de carga varia muito pouco da manhã para a tarde, no inverno. Quando não existe a BT o valor de LTE aumenta durante a tarde, conforme fica claro para a placa E3 (de 61,6 para 73,5%). Estes valores são intermediários àqueles indicados por Vandebossche [12] que seriam de 50% pela manhã e de 90% no período da tarde.

Figura 4 - Exemplo de retroanálise de deflexões ($E = 55.000 \text{ N/mm}^2$ e $k = 55 \text{ MPa/m}$)



As variações entre manhã e tarde e tarde e noite em geral encontram-se abaixo de ± 5 pontos percentuais, exceção feita à placa B3 onde esta variação atinge de 9 a 10 pontos percentuais. Porém uma variação de 10 pontos sobre um valor básico de 90% significa uma variação de cerca de 10% no LTE. Já no caso da placa E3, encontra-se uma variação de 12 pontos percentuais sobre um

LTE de 62%, o que representa um acréscimo de cerca de 20% no valor. Este resultado coincide com aqueles apresentados por Shahin [1] que afirmava que em estudos realizados para placas sem BT, valores de LTE no período da tarde em relação ao período da manhã variavam em 20% (variação positiva). Apenas para o caso de medidas de inverno fica evidente que, nas juntas com

Tabela 5 - Resultados de LTE (em %) a partir dos testes com diferentes níveis de carga

Posição	Placa	Inverno de 2006						Verão de 2007					
		Manhã			Tarde			Tarde			Noite		
		Carga do FWD (kN)			Carga do FWD (kN)			Carga do FWD (kN)			Carga do FWD (kN)		
		47	74	84	47	74	84	47	74	84	47	74	84
A1/A2	A1	95	96	96	93	93	93	95	94	94	93	92	92
	A1	96	95	96	93	93	92	94	94	94	93	93	92
B1/B2	B1	95	93	92	90	87	87	88	87	87	87	86	85
	B1	93	94	92	87	87	87	86	86	87	86	86	86
C1/C2	C1	94	94	94	91	89	89	95	94	94	94	94	94
	C1	94	100	94	91	90	91	93	96	93	94	94	94
D1/D2	D1	94	92	90	89	88	88	91	92	91	88	89	89
	D1	94	91	91	89	88	90	89	90	91	90	89	90
E1/E2	E1	95	94	95	92	94	92	93	93	93	97	98	97
	E1	95	94	95	92	91	93	93	93	93	97	96	97
A2/A3	A3	93	94	94	91	92	92	93	97	96	96	96	96
	A3	93	92	93	92	92	92	94	95	96	96	96	97
B2/B3	B3	100	100	100	92	90	90	87	88	88	96	96	96
	B3	100	98	98	90	89	88	87	87	87	96	96	95
C2/C3	C3	91	91	91	93	92	88	84	85	87	88	90	89
	C3	92	90	90	92	89	88	84	85	87	88	89	88
D2/D3	D3	92	91	91	91	89	90	95	94	91	89	90	89
	D3	92	91	91	91	89	90	95	95	93	91	91	90
E2/E3	E3	62	63	63	77	74	72	63	67	82	62	65	68
	E3	58	62	62	70	73	73	66	75	82	57	62	67

Tabela 6 – Resultados médios de LTE

Placa	LTE Inverno Manhã/2006	LTE Inverno Tarde/2006	LTE Verão Tarde/2007	LTE Verão Noite/2007	Espessura da placa (mm)	Tipo de base	BT
A1	95,8	92,8	94,3	92,6	150	BGS	Sim
B1	93,0	87,5	86,9	86,1	150	CCR	Sim
C1	94,9	90,0	94,2	94,0	250	CCR	Sim
D1	92,1	88,8	90,7	89,2	250	BGS	Sim
E1	94,6	92,4	92,9	97,1	250	BGS	Sim
A3	93,2	91,9	95,2	96,0	150	BGS	Sim
B3	99,3	89,7	87,7	95,9	150	CCR	Sim
C3	90,6	90,4	85,2	88,5	250	CCR	Sim
D3	91,4	90,1	94,4	90,1	250	BGS	Sim
E3	61,6	73,5	72,3	63,6	250	BGS	Não

Figura 5 – Valores de LTE nas juntas durante o inverno de 2006 e verão de 2007

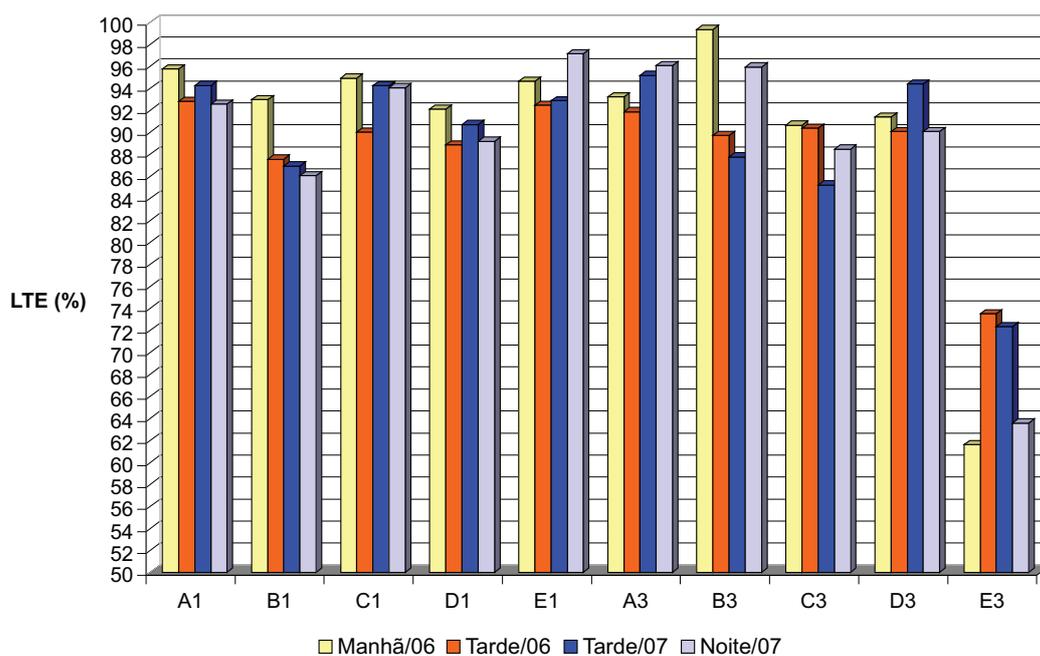
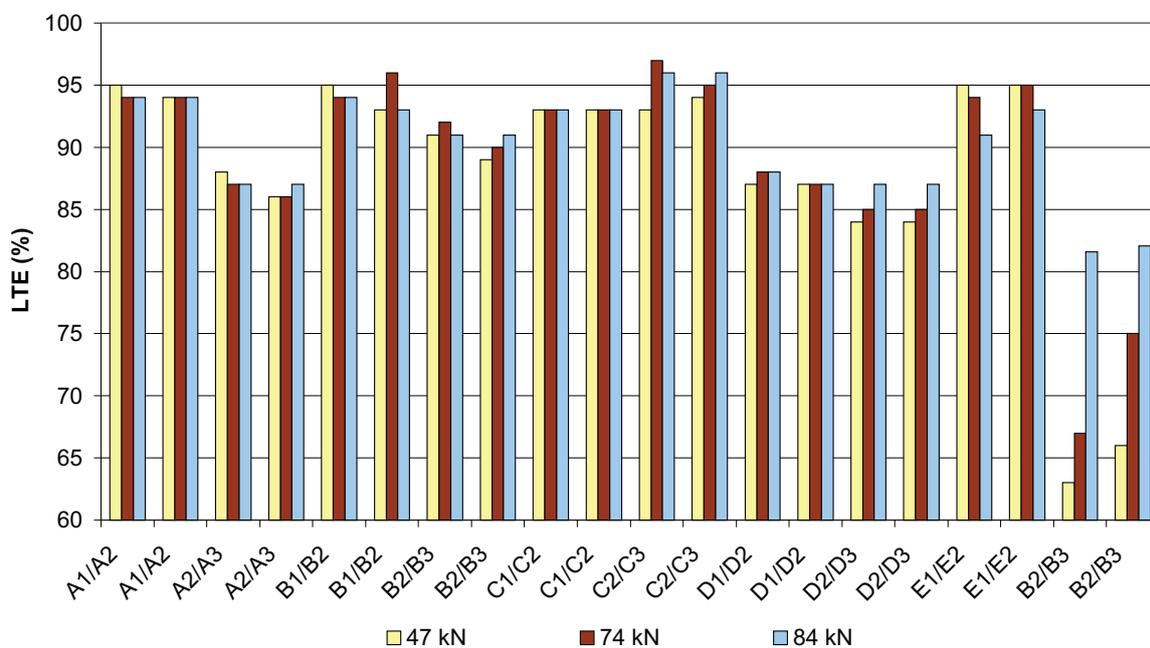


Figura 6 – Efeito do nível de carga aplicada sobre o valor de LTE



barras de transferência de carga, os valores de LTE diminuem da manhã para a tarde, sem exceções. Essa assertiva de modo geral é prejudicada, pois, nas medidas de verão, isso não foi verificado. Tais fatos estão bem elucidados na representação gráfica da Figura [5] para o inverno de 2006 e o verão de 2007. Durante o inverno, na maioria dos casos de placas com BT a LTE não varia ou pouco diminui no período da tarde, e quando diminui não há quedas que conduzam a valores inferiores a 90% em média. Toma-se 90% como um excelente valor de LTE posto que o sistema construtivo possa apresentar deficiência de apoio na base nas proximidades da junta, por exemplo, reduzindo o LTE. Observa-se, contudo, queda apreciável no valor do LTE quando não há transferência de carga com BT, que no caso foi de aproximadamente 95% (com BT) para 65% (sem BT).

Há ainda uma importante transferência de carga no caso da placa E3 devida ao entrosamento na face fissurada mesmo na ausência da BT. Além disso, a resposta das medidas é bastante coerente, pois com o aumento da temperatura de topo de cerca de 10°C (ver Tabela [4]) entre a medida da manhã (11 h) para aquela da tarde (14 h), na placa E3, o LTE aumentou; isto significa que a placa teria expandido e a abertura da junta, em consequência, diminuído, o que causaria maior entrosamento entre ambas, melhorando a transferência de carga, como na prática se observou; em outras palavras, há incremento no valor do módulo em cisalhamento da interface por entrosamento dos agregados nessa superfície fissurada. Conclui-se, portanto, que durante os períodos sem insolação, quando o concreto retoma seu volume original (de construção) ou se contrai, o LTE deverá ser menor ainda que aquele valor observado para 11h, no caso de ausência de BT nas juntas. Os valores de LTE medidos no dia de verão, que resultaram em valores também

elevados para juntas com BT e reduzidos para juntas sem BT, não sofreram alterações importantes em relação ao inverno.

Assim, parcela da transferência, que é medida como uma relação entre deflexões totais nas proximidades da junta poderá ser decorrente da deformação elástica da superfície da base. Nem sempre é uma tarefa fácil, com medidas de valores de deflexão na superfície das placas, individualizar o que é contribuição de cada camada. Todavia, os resultados obtidos permitiriam ainda algumas especulações sobre os efeitos de transferência de cargas em situações diferenciadas quanto ao tipo de base, espessura de placa, etc., conforme se faz na sequência. Na Figura [6] são apresentados resultados de LTE em relação ao nível de carregamento aplicado nas proximidades das juntas das placas. Observa-se que em juntas sem BT quanto maior a carga aplicada maior a eficiência de transferência de carga na junta. No caso de placas com BT nas juntas não existem diferenças marcantes entre os níveis de carga aplicadas e o LTE.

Na Tabela [7] são indicados valores retroanalizados com o programa ILSAB 2000 de eficiência de transferência de carga tanto para os testes realizados em julho de 2006 (inverno) quanto em março de 2007 (verão). Os valores de LTE retroanalizados em juntas com BT para as medidas de inverno variaram entre 90 e 99%, não sendo possível distinguir efeitos claros do tipo de base e de espessura da placa de concreto. Durante o verão tais valores variaram entre 86 e 99% novamente não sendo possível estabelecer padrões de comportamento. Todos esses valores são típicos de pavimentos novos, o que se justifica pela não ocorrência de tráfego comercial nas seções experimentais, que são um estacionamento de automóveis. Já no caso da junta sem barra de transferência de carga, no inverno, no período da manhã, o LTE foi sensivelmente inferior que no período da tarde (em torno de 50% contra 70%).

No verão não foram verificadas variações tão importantes entre tarde e noite, mesmo porque nesta época do ano a variação da temperatura ambiente é menor que no inverno.

Observa-se dos resultados que os valores de LTE em juntas com BT variaram de 88 a 100%, enquanto que os obtidos em juntas sem BT variaram de 60 a 75%. Na Figura [7] tais dados são lançados um em função do outro, o que permite comparar qualitativamente as discrepâncias entre valores de LTE medidos e retro-analisados. Verifica-se que, para valores baixos de LTE (<80%), casos sem BT, os valores de LTE medidos são em geral superiores àqueles calculados. De forma diferente, no caso de LTE em juntas com BT, os valores retro-analisados são em sua maioria superiores àqueles calculados. Com base nas médias de valores de LTE retro-analisados e medidos em campo em juntas com BT, conforme ilustradas na Figura [8], verifica-se que os valores de LTE retro-analisados são em geral mais altos do que os valores medidos em campo, em juntas com BT.

Calculando-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação

de dados de LTE retro-analisado e medido em campo em juntas sem BT, ilustrados na Figura [9], verifica-se o contrário: valores de LTE medidos em campo são em geral maiores do que os retro-analisados pelo ISLAB2000. Nota-se também que a discrepância entre os valores de LTE retro-analisados e medidos aumenta nos períodos em que a abertura da junta era maior: na manhã e na noite. Assim, o programa ISLAB2000 simula condições mais críticas de transferência de carga (mais baixos valores de LTE) para mesmas medidas de deflexões em campo e teoricamente definidas. Este resultado corrobora com resultados anteriores com uso do programa ISLAB [29] que indicaram maiores tensões calculadas pelo programa que aquelas determinadas com medidas de deformações em pista; ou seja, o modelo numérico do ISLAB2000, nessas condições, apresenta resultados a favor da segurança para fins de projeto.

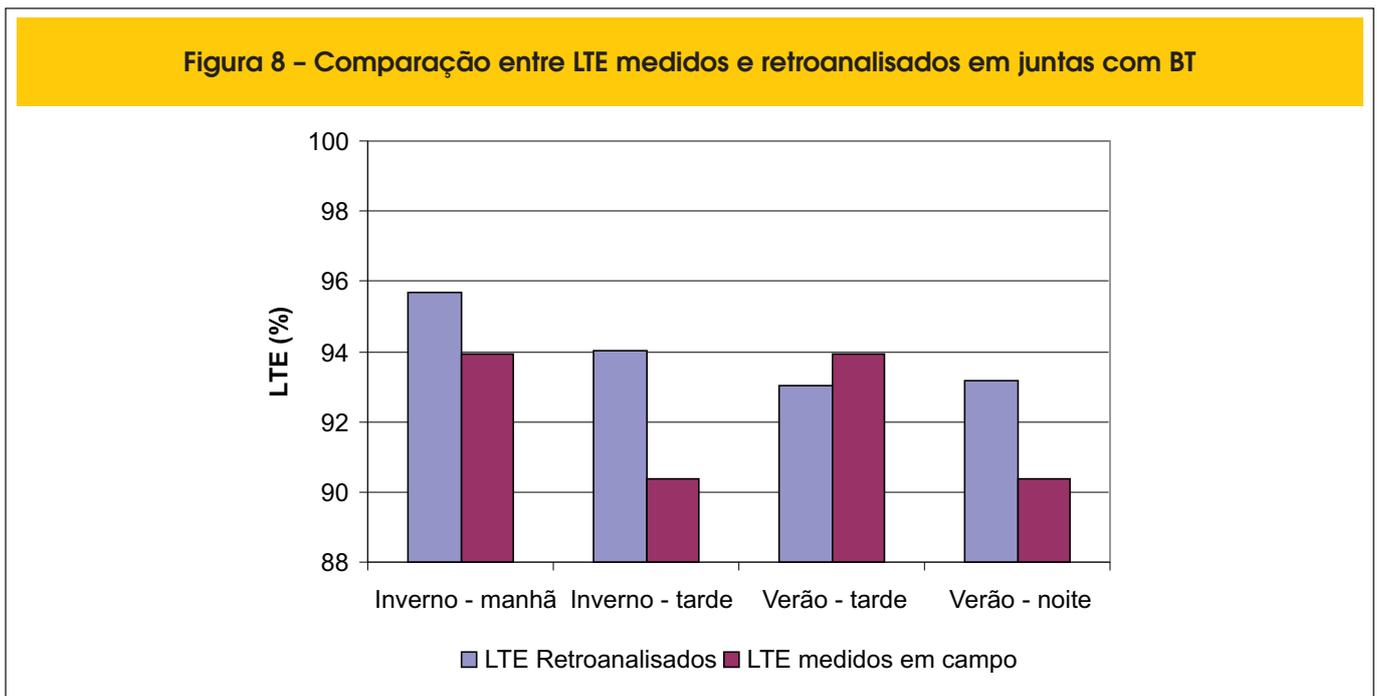
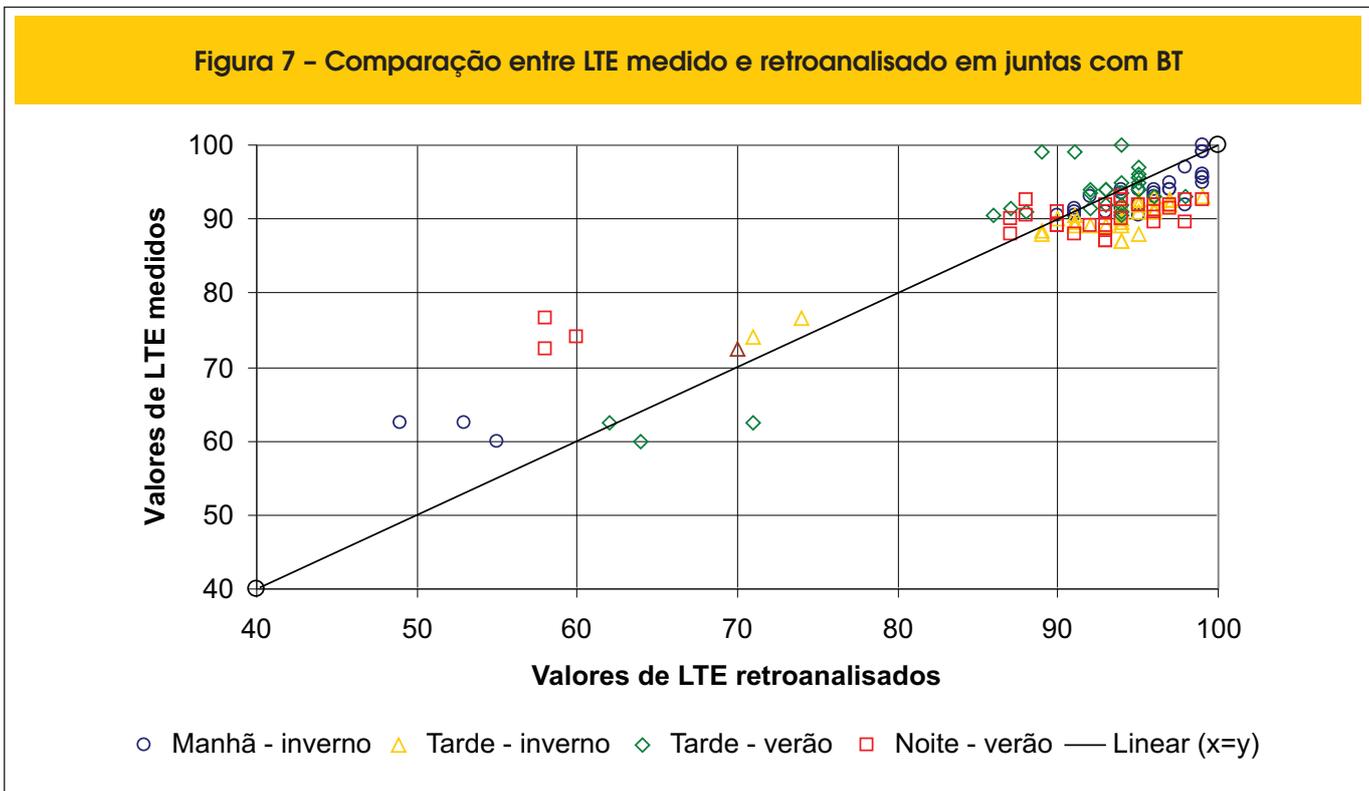
Contudo, as médias de valores de LTE retro-analisados e medidos em campo são muito próximas, não permitindo grande diferenciação nos resultados. Inclusive os resultados apresentam valores de desvio

Tabela 7 – Valores de LTE retro-analisados

Posição	Carga (kN)	LTE (%)		LTE (%)		Posição	Carga (kN)	LTE (%)		LTE (%)	
		Julho de 2006		Março de 2007				Julho de 2006		Março de 2007	
		Manhã	Tarde	Noite	Tarde			Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
A1/A2	47	99	95	94	96	C2/C3	47	91	87	88	95
	74	99	95	94	99		74	91	86	88	91
	83	99	95	95	97		83	90	-	87	89
A2/A3	47	96	96	97	96	D1/D2	47	94	93	90	93
	74	92	98	96	95		74	94	92	91	95
	8	94	92	93	94		83	95	94	92	94
B1/B2	47	96	93	93	89	D2/D3	47	95	94	90	94
	74	96	94	93	94		74	93	94	90	92
	83	98	93	93	94		83	91	88	87	90
B2/B3	47	99	94	96	96	E1/E2	47	97	95	97	97
	74	99	91	98	91		74	97	92	99	97
	83	99	89	93	91		83	99	94	98	97
C1/C2	47	95	95	93	95	E2/E3	47	55	64	58	74
	74	98	95	96	94		74	53	62	60	71
	83	97	95	94	94		83	49	71	58	70

padrão e de coeficiente de variação muito baixos, em especial para as juntas com BT (o desvio padrão máximo observado foi de 3,4%, bastante positivo para medidas efetuadas em campo), o que permite boa confiabilidade nos resultados obtidos por meio da metodologia empregada. Tais resultados estão provavelmente atrelados à grande

homogeneidade de construção da pista experimental. Os valores aqui obtidos são inferiores àqueles sugeridos por Khazanovich e Gotlif [10]: coeficiente de variação em torno de 10% para juntas com BT e de 40% para juntas sem BT; pese-se aqui o fato de que aquela pesquisa foi muito mais ampla e contemplou pavimentos de diferentes idades,



estruturas e condições dos concretos em geral. Como evidenciaram Colley e Humphrey [11] a transferência de cargas em juntas sem BT é extremamente dependente da abertura da junta; esta abertura depende essencialmente da temperatura média do concreto. Em períodos mais frios, com a contração do concreto, as juntas se abrem, causando a queda no valor de LTE, o que foi visível no presente estudo.

5. Conclusões

Com base nas investigações e análises experimentais realizadas pode-se evidenciar e concluir que:

- Os valores individuais de LTE demonstram que a presença de BT nas juntas transversais resulta em acréscimo expressivo em seu valor em comparação ao caso de juntas sem BT;
- Os valores de LTE em placas sem BT apresentaram aumento em função do incremento de carga durante o para o verão;
- Em placas com BT não existe diferença significativa para valores de LTE em diferentes níveis de carregamento, tanto no inverno quanto no verão;
- Em todas as juntas de placas com BT, a transferência de carga varia muito pouco da manhã para a tarde, no inverno;
- Quando não existe a BT o valor de LTE aumenta durante a tarde, bem como são maiores no verão;
- Os valores de LTE variam, em placas com BT, em cerca de 10% em média, entre tarde e noite;
- Os valores de LTE variam, em placas sem BT, em cerca de 20% em média, entre tarde e noite;
- Observa-se, contudo, queda apreciável no valor do LTE quando não há transferência de carga com BT, que no caso foi aproximadamente de 95% (com BT) para 65% (sem BT).

Com base nas retroanálises elaboradas com o programa

ILAB2000, pode-se concluir também que:

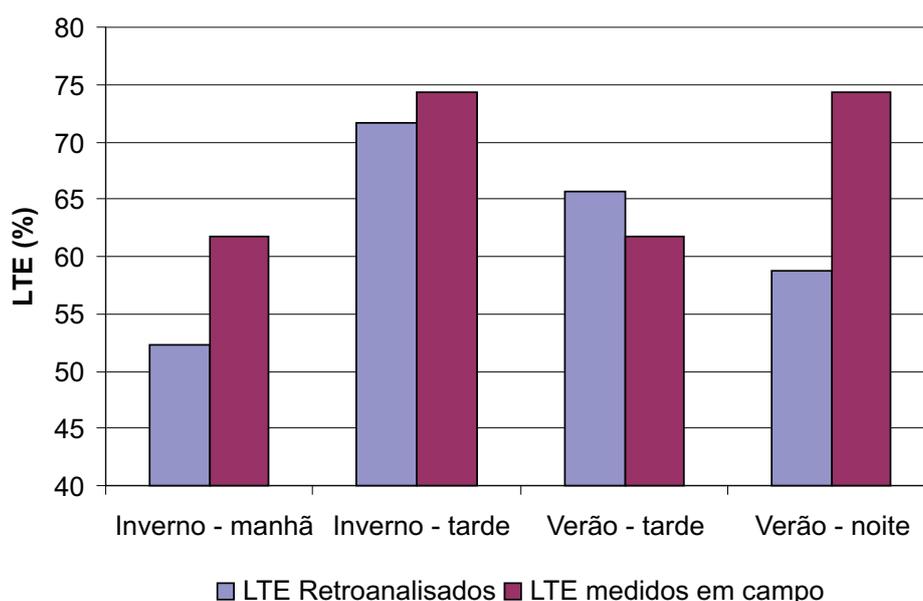
- Os valores de LTE retroanalizados em juntas com BT para as medidas de inverno variaram entre 90 e 99%, não sendo possível distinguir efeitos claros do tipo de base e de espessura da placa de concreto. Durante o verão tais valores variaram entre 86 e 99% novamente não sendo possível estabelecer padrões de comportamento;
- No caso da junta sem BT, no inverno, no período da manhã, o LTE foi sensivelmente inferior que no período da tarde (em torno de 50% contra 70%);
- Para baixos valores de LTE (<80%), casos sem BT, os valores de LTE medidos são em geral superiores àqueles calculados. De forma diferente, no caso de LTE em juntas com BT, os valores retroanalizados são em sua maioria superiores àqueles calculados.
- As médias de valores de LTE retroanalizados e medidos em campo são muito próximas, com desvio padrão e de coeficiente de variação muito pequenos, não permitindo grande diferenciação nos resultados.

Os resultados obtidos apontam a necessidade de consideração explícita das variações do LTE no comportamento de placas de concreto sem barras de transferência de cargas para pavimentação, pois, conforme hora do dia ou estação climática, a transferência de esforços nas juntas altera bastante, o que ocasiona variações na distribuição de tensões nesses elementos críticos de projeto.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro aos trabalhos desenvolvidos.

Figura 9 - Comparação entre LTE medidos e retroanalizados em juntas sem BT



7. Referências bibliográficas

- [01] SHAHIN, M. Y. Use of the falling weight deflectometer for the non-destructive deflection testing of jointed concrete airfield pavements. In: Proceedings, 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, pp. 549–556, 1985.
- [02] PEREIRA, D. S.; BALBO, J. T.; KHAZANOVICH, L. Theoretical and field evaluation of interaction between ultra-thin whitetopping and existing asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 251-260, 2006.
- [03] AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. Effect of pavement surface type on fuel consumption. Skokie, 1989.
- [04] PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Dimensionamento de pavimentos de concreto. IP-07/2004, São Paulo, 2004.
- [05] PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete highway and street pavements. EB109P, Skokie, 1984.
- [06] FRIBERG, B. F. Load and deflection characteristics of dowels in transverse joints of concrete pavements. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 105, pp. 140-161, 1938.
- [07] KHAZANOVICH, L. Execução de juntas e transferência de cargas em pisos de concreto: controvérsias e fatos reais. Tradução: José Tadeu Balbo. *Revista Concreto & Construções*, Instituto Brasileiro do Concreto, n.º. 45, ISSN 1809-7197, pp.15-18, São Paulo, 2007.
- [08] JACKSON, F. H.; ALLEN, H. (1948) Concrete pavements on the German autobahen. *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 20, n. 4, pp. 933-976, Detroit.
- [09] RODRIGUES, L. F.; PINHEIRO, L. M.; GUINAMÃES, G. N. Joints in plain concrete pavements: an experimental study of load transfer mechanisms. Proceedings of the International Workshop on Best Practices for Concrete Pavements (Cd-rom), Brazilian Concrete Institute, Recife, 2007.
- [10] KHAZANOVICH, L.; GOTLIF, A. Evaluation Of joint and crack load transfer. Final Report, Federal Highway Administration, FHWA-RD-02-088, Washington, D.C., 2003.
- [11] COLLEY, B. E.; HUMPHREY, H. A. Entrosagem de Agregados em Juntas de Pavimentação de Concreto de Cimento Portland. 2^o Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, Brasil, 1966.
- [12] VANDENBOSSCHE, J. M. Effects of slab temperature profiles on the use of falling weight deflectometer data to monitor joint performance and detect Voids. In: Transportation Research Board Annual Meeting, Compendium of papers (Cd-rom), Washington, D. C., 2007.
- [13] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Pavement rehabilitation manual. FHWA-ED-88-025, Washington, D.C., 1990.
- [14] ZOLLINGER, D. G.; BARENBERG, E. J. A Mechanistic based design procedure for jointed concrete pavements. In: Proceedings, 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, pp. 75–97, 1989.
- [15] BODOCSI, A.; MINKARAH, I. A.; ARUDI, R. S. Analysis of Horizontal Movements of Joints and Cracks in Portland Cement Concrete Pavements. In: Transportation Research Record n^o 1392, pp. 43-52. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1993.
- [16] GREER W. C. Evaluation of Strength Tests and Acceptance of Concrete Pavements. Proceedings: Fourth International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, 1989, pp. 375-383.
- [17] NISHIZAWA, T.; SHIMENO, S.; KOMATSUBARA, A.; KOYANAGAWA, M. Study on thermal stresses in continuously reinforced concrete pavement. In: Transportation Research Record n^o 1629, TRB, pp. 99-107, Washington, D.C., 1989.
- [18] POBLETE, M.; VALENZUELA, R.; SALSILLI R. Load transfer in undoweled transverse joints of PCC pavements. *Transportation Research Record* 1207, Washington, D. C., 1988.
- [19] PITTMAN, D. W. Load transfer characteristics of roller-compacted concrete pavement joints and cracks. In: Transportation Research Record n^o 1525, TRB, pp.01-09 Washington, D.C., 1996.
- [20] WESTERGAARD, H. M. Analysis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature. In: Proceedings of the 6th Annual Meeting of the Highway Research Board, pp. 201-215, Washington, D.C., 1926.
- [21] BALBO, J. T. Aplicação do método dos elementos finitos na avaliação estrutural de pavimentos rígidos rodoviários. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- [22] SPANGLER, M. G. Stresses in corner region of concrete pavements. Bulletin 157, Engineering Experiment Station, Iowa State College, Ames, 1942.
- [23] ZOLLINGER, D. G. Curing and finishing concrete pavements. Proceedings of the International Workshop on Best Practices for Concrete Pavements. Brazilian Concrete Institute and International Society for Concrete Pavements, Recife, (Cd-rom), 2007.
- [24] BALBO, J. T.; SEVERI, A. A. Thermal gradients in concrete pavements in tropical environment: an experimental appraisal. In: Transportation Research Record n^o 1809, TRB, pp.12-22, Washington, D.C., 2002.
- [25] HALL, K. T. Performance, Evaluation, and Rehabilitation of asphalt-overlaid concrete

- pavements. Ph.D. thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991.
- [26] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND OFFICIALS. Guide for design of pavement structures. Washington, D.C., 1993.
- [27] KHAZANOVICH, L. Structural analysis of multi-layered concrete pavement systems. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL. 1994.
- [28] KHAZANOVICH, L.; YU, H.T.; RAO, S.; GALASOVA K.; SHATS E; JONES R. ISLAB2000 - Finite element analysis program for rigid and composite pavements. User's Guide. Champaign, IL: ERES Consultants. 2000.
- [29] RODOLFO, M. P. Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.