



SOBRE O EMPENAMENTO TÉRMICO DE PLACAS RÍGIDAS DE CONCRETO ROLADO SOBRE APOIO ELÁSTICO

Raia, F.(1); Pappalardo Jr., A. (1); Mello Jr., A. G. (1); Bandeira, A. A. (2); Mattar Neto, M. (3)

(1) *Professor Doutor, Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie
Rua da Consolação, 930 - CEP 01302-907 - Consolação – São Paulo / SP – BRASIL*

(2) *Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02 - CEP 40210-630 - Federação – Salvador / BA – BRASIL*

(3) *Professor Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Lineu Prestes, 2242 - CEP 05508-000 - Cidade Universitária – São Paulo / SP – BRASIL*

Resumo

O estudo apresentado nesse trabalho é dedicado ao empenamento térmico de estruturas de concreto apoiadas uniformemente em meio elástico. Entre os fenômenos mais instigantes, vimos aquele em que a estrutura apresenta um arqueamento convexo de tal intensidade, que a reação normal aumenta nas bordas e demonstra um alívio na região central, quando se trata de estruturas retangulares ou quadradas. Com a finalidade de capturar tal efeito, foi construída uma estrutura rígida em duas camadas não aderidas, apoiadas sobre uma fundação artificial. Todo conjunto foi depositado sobre uma laje de reação interna em um laboratório que ofereceu recursos técnicos para a realização do experimento. Os resultados obtidos foram manipulados através de análise numérica, pelo método dos elementos finitos e confrontados com aqueles obtidos experimentalmente. Diante do exposto, objetiva-se verificar a existência de um desligamento entre duas camadas sobrepostas da estrutura rígida, mediante ao aquecimento superficial. Tal experimentação é baseada na hipótese que tensões de origem térmica são capazes de arquear a estrutura a ponto de apresentar a abertura. O experimento foi limitado a aquecimentos superficiais de baixa temperatura. A monitoração do fenômeno se deu de forma automática, através de um sistema de aquisição de sinais que recebeu informações de uma célula de carga posicionada entre a estrutura e a laje de reação e por um sensor de deslocamento posicionado nas bordas da estrutura. Conforme resultados da simulação numérica, que indica a existência da abertura, os dados experimentais vêm mostrando em determinadas situações que o peso próprio da estrutura é vencido contra a forte tendência que ela tem ao empenamento térmico.

Palavra-Chave: Tensões térmicas; Aquisição de dados; Placa de concreto; Elementos finitos.

Abstract

The study presented in this paper is devoted to the thermal warping of concrete structures supported uniformly in elastic place. Among the most intriguing phenomena, we saw that in which the structure has a convex bulge of such intensity that the normal reaction increases at the edges and shows a relief in the central region, when it comes to square or rectangular structures. In order to capture this effect, a rigid structure was built in two layers not adhering, resting on an artificial foundation. Every set was deposited on a slab of internal reaction in a lab that has offered technical resources to perform the experiment. The results were manipulated through numerical analysis by finite element method and compared with those obtained experimentally. So that, the objective is to verify the existence of an opening gap between two layers of rigid structure by the superficial warming. This experiment is based on the hypothesis that thermal stresses are capable of bending the structure as far as presenting the opening. The experiment was limited to superficial heating of low-temperature. The monitoring of the phenomenon occurred automatically, through a system of signals acquisition which received information from a load cell positioned between the frame and slab reaction and a displacement sensor placed at the edges of the structure. As results of numerical simulation, which indicates the existence of the gap, the experimental data have shown that in certain situations the self weight of the structure is won against the strong trend that it has to thermal warping.

Keywords: thermal stresses; data acquisition; concrete slab.



1 Introdução

As estruturas de concreto rolado apoiadas em meio elástico contínuo ocorrem com grande frequência na Engenharia Civil, especificamente na área de transportes – como é o caso de pavimentos rígidos –, e exibem uma característica interdisciplinar complexa abrangendo vários campos da Ciência. Além disso, os pavimentos proporcionam facilidades sociais, econômicas e humanas e, sem dúvida, favorecem a integração dos povos desde as primeiras construções que remontam ao Egito antigo.

O estudo de pavimentos rígidos, como área de pesquisa, mostra uma história rica de métodos analíticos e empíricos desenvolvidos desde a década de 20 até a simulação numérica, contando com recursos computacionais correspondentes aos anos 90. A exposição da placa do pavimento aos eventos do cotidiano traz o aparecimento de patologias que, apesar de serem conhecidas, levam os especialistas a realizar experimentos específicos, no sentido de obter maiores conhecimentos. Então, na tentativa de propor soluções a problemas práticos e técnicos, esse ramo da Ciência enveredou por vários caminhos, um deles é aquele que busca refinamento teórico com informações geradas por experiências conduzidas em campo por meio de pistas reais ou em pistas experimentais.

As informações geradas por esses experimentos são tratadas, interpretadas e levadas novamente a campo, aprimorando, dessa forma, os métodos utilizados. Esse refinamento, feito pela mensuração dos fenômenos físicos, por meio dos processos experimentais, é uma boa maneira para estudar o comportamento da estrutura frente às solicitações às quais ela estará sujeito durante a sua vida. Dentre elas pode-se destacar as variações da temperatura, as deformações e as tensões. Essas informações têm um papel fundamental para ajuste de teoria ou validações em modelos matemáticos ou, ainda, confrontação para modelos estatísticos de previsão.

A pesquisa bibliográfica realizada indicou que, em todas as situações estudadas, as placas foram analisadas em campo, sob condições ambientais normais e expostas à sazonalidade. Apesar desse processo retratar a veracidade do comportamento da estrutura, impede que alguns procedimentos possam ser revistos, repetidos ou modificados. Além do mais, sabe-se que, mesmo em uma dada estação do ano, um dia não é exatamente igual ao anterior, sem contar que não existe a possibilidade da realização de testes acelerados com repetição de ciclos rápidos de temperatura. Em razão desses detalhes, o trabalho aqui proposto visou à confecção de uma estrutura de concreto em forma de uma placa de cimento Portland (CCP), em tamanho reduzido, para ensaiar as condições de campo em situações controladas dentro de um laboratório e estudar as tensões e deformações sob carregamento térmico.

A vantagem da realização de experimentos dessa natureza é o controle sobre alguns parâmetros importantes, tais como intensidade das cargas impostas, deformações, temperaturas ou, ainda, estudos estruturais com diferentes composições de espessuras, diferentes composições de forma, materiais e até medidas de aderência entre estruturas contíguas. No entanto, o mais importante é a possibilidade de realização de testes acelerados que demandam intervalos de tempo relativamente longos, da ordem de meses ou anos. A intenção técnica desses experimentos sempre foi a busca de dados que pudessem ser confrontados ou utilizados pelos critérios de dimensionamento empírico ou



mecanicista, utilizados pelos projetistas, no sentido de obter informações capazes de estimar o comportamento da estrutura frente às solicitações às quais fica exposta.

No Brasil, a aplicação do concreto, segundo Severi e Balbo, (2001) e Rodolfo, (2001), como uma estrutura para pavimentação, remonta à década de 40 com a construção de pavimentos rodoviários e pistas de aeroportos. No entanto, as primeiras experiências com instrumentação começaram na década de 70. No Estado de São Paulo, os experimentos iniciais foram realizados na primeira pista experimental, construída na Universidade de São Paulo no ano de 1999 por ocasião do trabalho realizado por Rodolfo (2001).

O comportamento do pavimento, com relação ao carregamento térmico, aliado ao carregamento estático, poderá servir, com seus dados, para os estudos da falha do pavimento sob as circunstâncias impostas. Esse aspecto é investigado por Mahboub, Liu e Allen (2004), que mostraram a necessidade de acrescentar conhecimento sobre o comportamento da placa sob carregamento térmico e aqueles induzidos pela carga rodoviária.

Diante do panorama exposto, o presente trabalho apresenta resultados obtidos a partir de uma estrutura de concreto que foi construída em laboratório e instrumentada com sensores de deformação, deslocamento, carga e de temperatura. Ela foi submetida a diferenciais de temperatura simulados manualmente e seguiu o comportamento diário. O laboratório foi capaz de dar suporte a todas as exigências que o experimento necessitou.

Justifica-se esse estudo no sentido de contribuir para o conhecimento do comportamento estrutural de placas rígidas de concreto submetidas a diferencial de temperatura realizados sob condições que venham se adequar às diversas situações e condições do cotidiano. Indiretamente, esse trabalho, apresenta uma metodologia para testes acelerados, em laboratório, em placas de concreto com alternância do estado térmico.

Os resultados são apresentados através dos dados experimentais e das simulações numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF).

2 Efeito da Temperatura

2.1 Empenamento de uma Placa Rígida de Concreto

A tendência de uma estrutura sofrer um empenamento devido a diferenciais de temperatura entre faces opostas é fato conhecido desde os primeiros estudos analíticos realizados por Westergaard (1927). Os métodos para estudo ou análise do comportamento da estrutura com as influências das camadas inferiores ou, ainda, o efeito de cargas combinadas sob diferencial térmico geraram vários modelos matemáticos em que os fenômenos foram abordados sistematicamente na forma analítica e numérica. Uma descrição dessas abordagens pode ser vista em Severi (2002) que, de forma metódica, relatou cronologicamente os modelos e soluções clássicas e modernas a respeito dos problemas que envolvem o estado térmico da placa de concreto e suas consequências.

No trabalho pioneiro sobre o comportamento da placa, realizado por Westergaard (1926), considerou-se a placa sobre uma fundação elástica, com contato pleno com o apoio (que atua como um conjunto de molas idênticas e dispostas de tal forma a responder esforços externos na vertical, sem ocorrer esforços na horizontal). Posteriormente, Westergaard (1927) considerou os efeitos da temperatura, sendo que sua variação, ocorrendo em toda

a extensão da placa, provocaria variações nas dimensões da placa e, conseqüentemente, apareceriam tensões decorrentes do atrito com o apoio. As variações de temperatura, ao longo da altura da placa, dão origem às tensões de flexão, tendendo a levantá-la, porém, devido ao peso próprio, ela se mantém na sua posição, ocasionando tensões de compressão no topo e tensões de tração no fundo. Harr e Leonards (1959), em um dos pioneiros trabalhos elaborados com um computador, realizando um processo de solução numérica, mostraram que diferenciais de temperatura de 2,0 °C (40,0 °F), entre superfície e fundo, provocam tensões elevadas.

Sobre os trabalhos de Westergaard, Ioannides et al. (1999) realizaram uma ampla discussão a respeito das soluções e considerações feitas, mostrando como os avanços tecnológicos alcançados nas últimas três décadas como: Método dos Elementos Finitos, Análises de Regressão Estatística e Redes Neurais Artificiais, interpretam as soluções dadas no começo do século passado. A obtenção de tensões desenvolvidas na placa é também explorada por Tang et al. (1993) que expõem essa característica de empenamento e desenvolvem analiticamente expressões para o cálculo das tensões originadas pelo diferencial de temperatura. No mesmo trabalho é mostrado que as configurações geométricas de um corpo rígido, no caso uma placa de concreto, tende a apresentar, mediante essas variações, um formato convexo durante o dia, devido ao diferencial de temperatura, e um formato côncavo no período noturno. Sobre a existência de um *gap* no fundo da placa, quando essa estiver sob regime térmico diário, Armaghani et al. (1987), através da instrumentação realizada em pista experimental, sobre o movimento de flexão da placa quando do surgimento de tensões, não comentam diretamente a existência dessa abertura (*gap*) mesmo com uma sensível instrumentação realizada com sensores de deslocamento do tipo *linear variable differential transformer* (LVDT), fixados nos extremos longitudinais da placa e do apoio. A existência de uma temperatura crítica, indicada por Tang et al. (1993), baseada na Teoria das Placas e relativa às soluções de Westergaard de uma placa rígida apoiada sobre uma fundação elástico (tipo Winkler), indica a ocorrência de uma abertura entre a placa e o apoio, ilustrado de forma amplificada pela Figura 1.

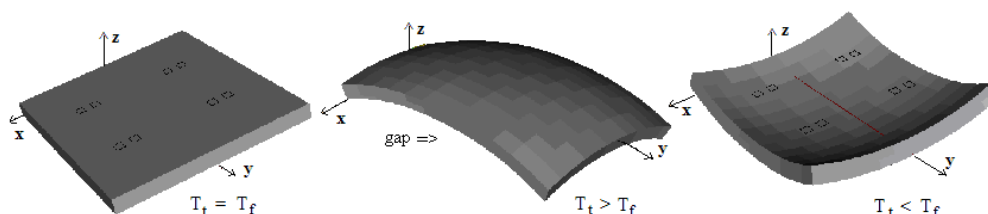


Figura 1 Vista isométrica do comportamento da placa sob ação de um diferencial de temperatura. Gerado a partir do *software* livre EverFE 2.24 (DAVIDS, 1998)

Em um trabalho experimental, Rodolfo (2001) indica que, devido ao peso próprio, uma placa de concreto não exibe tal *gap*. Porém, Rufino e Roesler (2006), através de um trabalho sobre interação de placa com o apoio, em uma estrutura aeroportuária instrumentada, mostram a existência de um abertura com o apoio no fundo da placa.

2.2 Variáveis Térmicas

O procedimento escolhido para aquecimento da estrutura baseou-se na idéia do enclausuramento térmico feito por meio de resistências elétricas. Dessa forma, a temperatura local ficou sujeita à eficiência do sistema de aquecimento, através da transmissão de calor por radiação.

A condução do calor através da estrutura foi tratada pela Lei de Fourier, onde se estabelece o conceito de gradiente térmico. Uma observação referente ao gradiente térmico, expresso como: a diferença das temperaturas de topo e fundo dividido pela espessura. No entanto, o gradiente em R^2 é definido como sendo a direção de um vetor que se projeta sobre o plano xy e é denotado por:

$$\nabla f(x, y) = f_x(x, y)\vec{i} + f_y(x, y)\vec{j} \quad (\text{Equação 1})$$

A lei de Fourier, para condução térmica em um sólido em uma única direção pode ser escrita como:

$$\frac{dQ}{dt} = -k_c A \frac{d\theta}{dx} \quad , \quad (\text{Equação 2})$$

cuja quantidade $d\theta/dx$ é chamada de gradiente térmico que expressa a funcionalidade entre a temperatura e o fluxo de calor. As grandezas devidas à radiação térmica, emitida (pela estrutura), incidente, refletida e absorvida, convecção com o ambiente e aquela transmitida não foram tratadas e nem simuladas isoladamente devido às limitações da experiência. A condução de calor ao longo da placa, considerada semi-infinita, foi tratada de forma transiente. Um aspecto que deve ser considerado é o fato dos materiais sofrerem deformação por origem térmica, devido a possuírem coeficiente de dilatação não nulo. Mediante a isso, o surgimento de tensões em um sólido é inevitável, desde que exista uma diferença de temperatura atuante sobre ele. Ou, não sendo assim, tenha a liberdade de movimento restrita.

2.3 Controle do Aquecimento da Estrutura

O controle térmico da placa foi realizado por um sistema eletromecânico, composto por um autotransformador variável trifásico de 9,0 kVA. Ele possibilitou o controle da tensão de saída em intervalos frequentes para atingir as taxas de crescimento desejadas. A reprodução das taxas de aquecimento foi realizada com sucesso e um padrão típico, utilizado para gerar uma rampa de aquecimento, é dado pela Tabela 1. A geração dos diferenciais de temperatura foi baseada na curva de radiação solar devido ao ciclo diário e pode ser vista na figura 2.

A figura 3 mostra como fica a potência dissipada pela plataforma de aquecimento em função do tempo baseado nos dados da Tabela 1. Essa figura é uma representação média das ações térmicas impostas sobre a estrutura. Na figura 4 pode ser visto a sobreposição de dois efeitos: o aspecto da manobra elétrica para obtenção do padrão de aquecimento e o comportamento da temperatura ao longo da espessura da estrutura.

Tabela 1 – Padrão de tensão estabelecido durante os testes.

Tensão (V)	Tempo Absoluto	Potência (W)	Intensidade (W/m ²)
70,0	08:40	751,1	140,7
90,0	09:00	1241,6	232,5
110,0	09:30	1857,7	315,0
120,0	10:38	2207,2	445,0
150,0	12:03	3448,8	645,8
160,0	13:23	3924,0	734,8
150,0	14:37	2207,2	562,6
100,0	15:44	1532,2	286,9
0,0	16:15	0,0	0,0

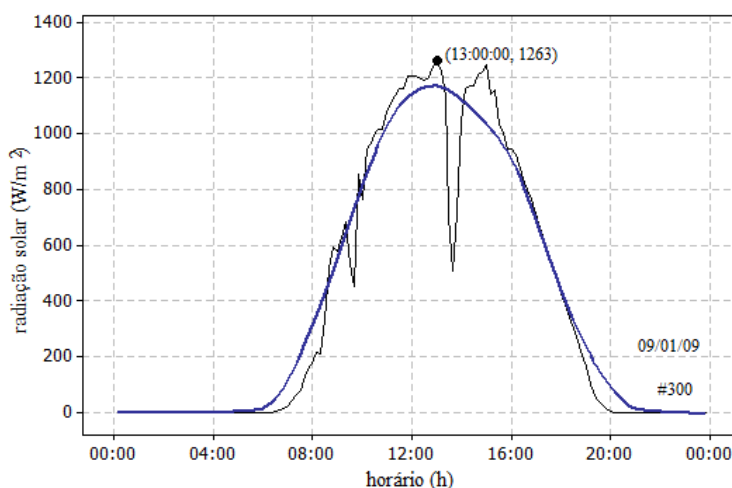


Figura 2 – Distribuição da radiação solar dia 09/01/08. A linha cheia representa a tendência da radiação caso não fossem as ações de sombras causadas por nuvens.

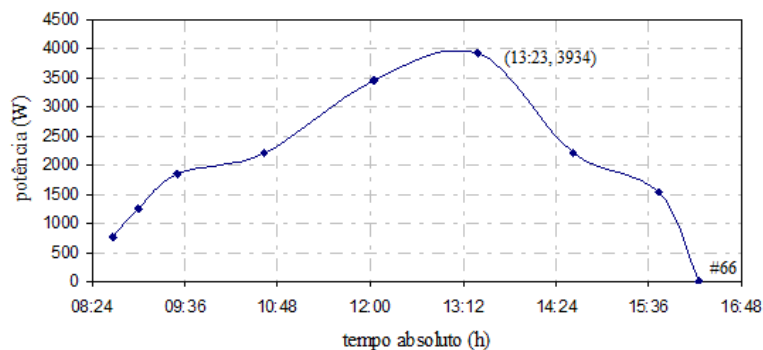


Figura 3 – Potência dissipada pelo conjunto de resistências na plataforma de aquecimento

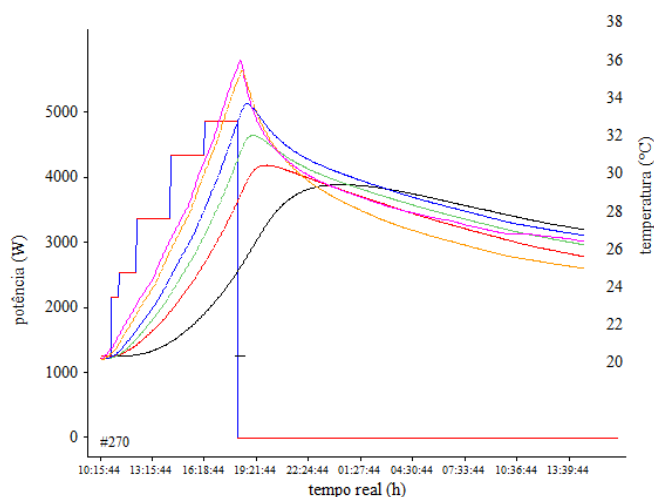


Figura 4 – Ação do controle de tensão sobre o efeito da temperatura.

2.4 Instrumentação da Estrutura

Para observar o empenamento da estrutura, uma célula de carga foi colocada no centro da mesma. Ela foi fixada magneticamente entre o fundo da placa e a superfície de uma laje de reação, onde foram realizados os testes. A figura 5(a) mostra a célula de carga e seus componentes; a Figura 5(b) mostra a base da estrutura com a cavidade central para a colocação da célula de carga, e a Figura 5(c) apresenta a célula posicionada dentro da cavidade já fixada, magneticamente, na laje de reação.



Figura 5 – (a) célula de carga com base magnética para fixação no piso da laje de reação, (b) base com a cavidade de abrigo (poço) da célula de carga, (c) célula de carga posicionada dentro da cavidade.

A célula de carga foi colocada e fixada dentro da cavidade antes da construção da placa. A fixação foi realizada através de um anteparo de alumínio que foi interconectado, mecanicamente, à célula por meio de uma haste de aço. A figura 6 traz a representação em corte transversal da estrutura, e ilustra a disposição da célula dentro da cavidade e como ela ficou disposta entre as camadas. Sobre a estrutura foi construído um dispositivo de aquecimento capaz de elevar a temperatura desde a temperatura ambiente até aquela especificada. As taxas de aquecimento foram conseguidas por meio de valores obtidos em trabalhos científicos. No momento em que esta superfície de indução térmica é ligada, a estrutura do pavimento possui uma temperatura ambiente de 22°C. Ao longo do tempo,

a placa aquece conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e, então, são medidos os valores das tensões, deformações, deslocamentos e das temperaturas em diversos pontos da estrutura.

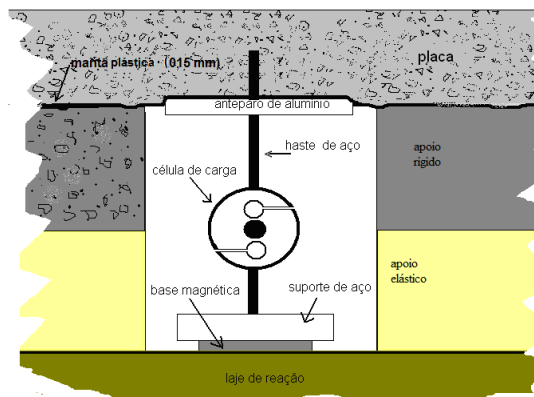


Figura 6 – Corte transversal do poço, onde está localizado o sistema célula de carga e base magnética para detectar o empenamento da placa

3 Modelagem Numérica-Experimental

3.1 Generalidades

A modelagem numérica foi abordada com a finalidade de apresentar uma visualização do experimento realizado e estabelecer uma comparação entre os resultados experimentais. A grande dificuldade na modelagem numérica é a real caracterização dos materiais frente às suas propriedades. Muitos modelos surgiram para descrever o real comportamento da estrutura e sua resposta de que, nem sempre, são adequados aos dados obtidos no experimento. Atualmente, o método mais utilizado para realizar tal simulação é conhecido Método dos Elementos Finitos (MEF). Contudo, a literatura tem indicado que, aplicado aos problemas envolvendo análises de estruturas com materiais do tipo não isotrópico (que é o caso do concreto), o método costuma indicar, em algumas situações, uma majoração de valores em relação àqueles obtidos na prática. Nishizawa e Matsuno (1983), por meio da modelagem por elementos finitos, mostraram uma discrepância entre valores analisados de um sólido (placa) repousando sobre dois tipos de fundação e comparou os resultados com valores medidos. Os resultados não foram compatíveis e, por conta deste fato, atribuiu as diferenças obtidas ao baixo nível de discretização do modelo de elementos finitos. Porém, há de se perceber, que o sucesso de um modelo está fortemente ligado à habilidade e ao conhecimento do projetista e ao desenvolvimento de novos elementos que capturem o comportamento real da estrutura. Essas discrepâncias podem estar vinculadas inadequada formulação do elemento finito utilizado em se adaptar às mudanças que ocorrem na estrutura durante a sua vida. Além do mais, observa-se que a natureza apresenta características não-lineares e que o elemento finito, segundo Burden e Faires, (2003) é produto de uma linearização de equações diferenciais parciais. Diante disso, reforça-se, mais uma vez, que a melhor maneira de se estudar a prática vem por meio da instrumentação e que, através dela, montam-se diretrizes para que os pesquisadores possam desenvolver elementos finitos mais realistas para que a

simulação seja a mais fiel possível. Para auxiliar o processo de interpretação e, aferição dos dados gerados pelo sistema de aquisição de dados, foi utilizado o software livre EverFE 2.24. Este programa foi idealizado tendo como base o Método dos Elementos Finitos. Ele utiliza um modelo de interligação entre os elementos que compõem a estrutura, que no caso são o cimento e o agregado, para estabelecer transferência de carga entre eles WALVAREM (1981). O modelamento para a perda de contato entre placa e suporte, quando não aderidas, tem grande significado para o estudo do empenamento.

3.2 Comportamento Térmico da Placa

O empenamento produzido na estrutura, devido ao diferencial de temperatura entre topo e fundo, pôde ser verificado pela resposta da célula de carga. A figura 7 mostra o comportamento da estrutura frente ao aquecimento em função do tempo. Observa-se que o ritmo de arqueamento segue o ritmo de aquecimento, apresentando um máximo no instante no qual cessa o aquecimento. Desse ponto em diante a estrutura passa por um processo de resfriamento atingindo valores de cargas semelhantes ao aquecimento. Quanto ao aparecimento da folga, não foi possível realizar uma medida, e sua existência baseia-se no descolamento da célula de carga, momento em que a tensão, indicada pela célula, cairia a zero. Nota-se que, na figura 7, o “zero” da escala de tensão corresponde a uma referência física, porque essa célula foi fundida juntamente com a massa fresca do concreto e interligou o fundo da placa com o topo da laje de reação. No entanto, Houbem (1994) *apud* Rodolfo (2001) através da análise numérica, observa que para gradientes de $\leq 0,03^\circ\text{C}/\text{mm}$ ocorre a perda de suporte ao longo da borda da placa e que quando é pequeno ($\leq 0,01^\circ\text{C}/\text{mm}$ a $0,01^\circ\text{C}/\text{mm}$) a placa está plenamente apoiada. Esse comportamento mostrou-se desde o início dos testes e perdurou em todos eles, mesmo para pequenos diferenciais de temperatura. Isso pode ser observado pela figura 8, que mostra a indicação da célula de carga (TRANSTEC), em função da temperatura e do tempo. No caso, a taxa de aquecimento foi de $2,5^\circ\text{C}/\text{h}$ em um período de onze horas. Percebe-se um comportamento crescente de uma força atuante, no sentido de tracionar a célula. O que é o mesmo como se a placa estivesse levantando.

A resposta da célula de carga é tão rápida quanto as primeiras fibras da placa e apresentam um diferencial de temperatura capaz de iniciar seu empenamento. Infelizmente o ponto de partida na qual a temperatura inicia a contração das fibras do concreto não pôde ser avaliado, pois está dentro do próprio erro do termômetro ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

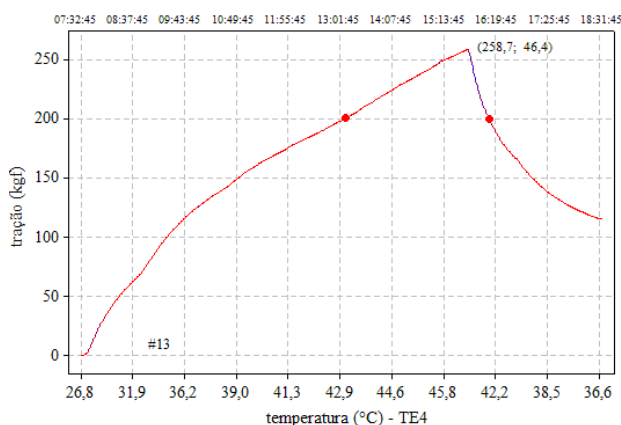


Figura 7 – Comportamento de flexão da placa devido à variação de temperatura

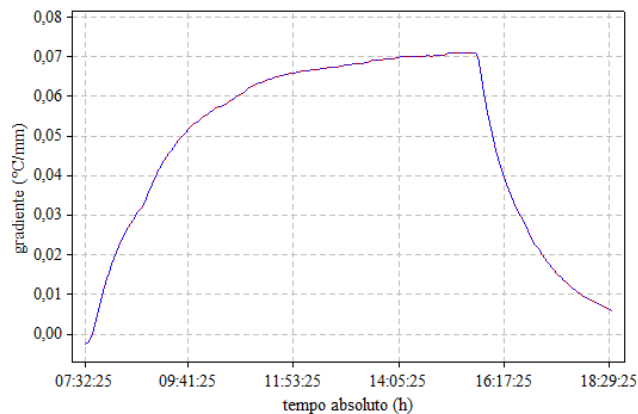


Figura 8 – Gradiente térmico em função do tempo durante o processo de aquecimento da placa.

Devido a não-linearidade da distribuição da temperatura ao longo da espessura da placa, o gradiente térmico (diferencial térmico pela espessura) também se comporta da mesma maneira e, esse efeito, pode ser visto por meio da figura 7. A estrutura só retorna à posição inicial, tração zero, somente após repouso de 48 horas. A figura 9 mostra um processo de aquecimento, onde o resíduo inicial foi de 53,9 N (5,5 kgf) e só foi alcançado após 24h. Ultrapassado esse tempo a estrutura inverte sua concavidade, pressionando a célula de carga. A figura 10 indica o comportamento da estrutura frente à repetição do teste anterior, tendo como diferença o tempo de repouso da placa (24 h). É possível perceber que, após esse tempo a placa inverte sua concavidade exercendo uma compressão na célula. Isso pode ser verificado tomando-se como referência o valor residual de 68,5 N (7,0 kgf) no início do teste e comparando-se com o valor lido no final do teste \square 27,4 N (\square 2,8 kgf). Esse comportamento é bem semelhante às ocorrências cotidianas. A quantificação do empenamento foi verificada, ainda, por informações retiradas de um sensor potenciométrico colocado no canto da estrutura. As suas leituras indicaram o movimento côncavo-convexo que a estrutura executava durante os testes de aquecimento e ou resfriamento durante os processos de aquecimento ou resfriamento.

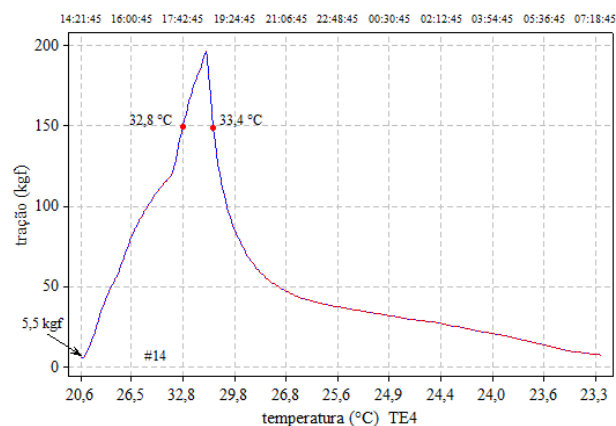


Figura 9 – Comportamento tensional da placa devido à variação de temperatura

@ 2010 - IBRACON

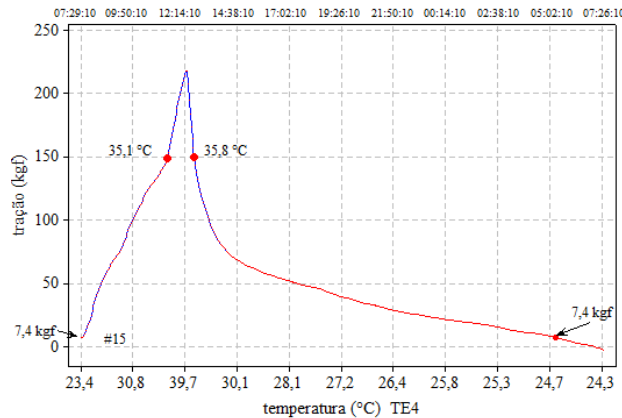


Figura 10 – Comportamento tensional da placa devido à variação de temperatura em teste com ciclo de 24 horas

3.3 Análise Numérica por Elementos Finitos

A análise numérica termo-estrutural foi realizada utilizando-se o programa comercial de elementos finitos ANSYS versão 11. O modelo é constituído por uma placa retangular de concreto simples, com as dimensões de 1,78 m x 3,00 m x 0,15 m, apoiada sobre uma superfície não-aderida de concreto rolado, com as mesmas dimensões em planta e espessura de 0,10m. As propriedades dos materiais e o modelo de elementos finitos são apresentados na figura 11. Pode-se observar na figura 11 que a placa foi discretizada com três elementos ao longo da espessura, enquanto que, a base, com apenas um elemento.

Para a simulação do comportamento do sistema estrutural na interface PLACA/BASE dois tipos de formulações foram utilizados. Para a transferência das tensões de cisalhamento foi utilizado o elemento finito não-linear COMBIN39 (ANSYS, 2007), esquematizado na figura 13(a). Por outro lado, a transferência de tensões de compressão é realizada pelo elemento finito não-linear LINK10 (ANSYS, 2007), mostrado na figura 13(b), que será coincidente com o elemento COMBIN39. Os deslocamentos no plano da interface são elásticos até que se atinja a tensão de aderência última, levando a partir daí ao escorregamento. O descolamento na interface PLACA/BASE acontecerá caso ocorra tensões de tração nesta interface. A interface entre o concreto rolado e a placa de poliuretano é perfeitamente aderida, sendo simulada por elementos unidimensionais de comportamento elástico-linear. Um esquema dos tipos de elementos finitos utilizados no modelo é apresentado na figura 12. As propriedades físicas dos materiais empregadas na análise são apresentadas na tabela 2. Um esquema do comportamento dos elementos não-lineares utilizados é apresentado na figura 13.

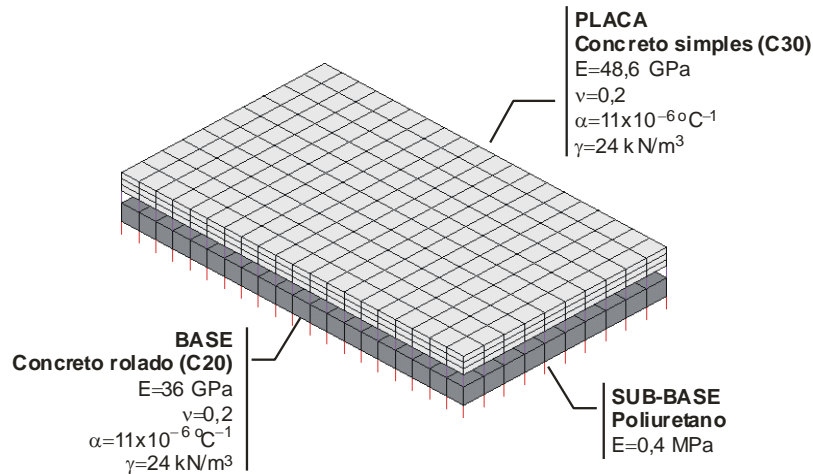


Figura 11 – Modelo de elementos finitos e propriedades físicas dos materiais

Não foram levados em conta os efeitos transientes do carregamento térmico, dado na figura 14, sendo a análise considerada em regime permanente.

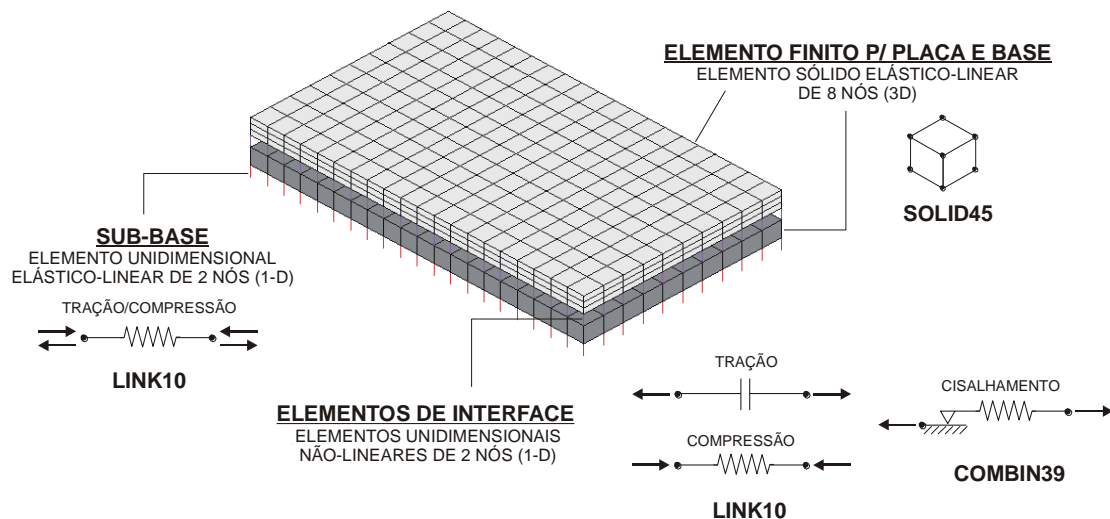
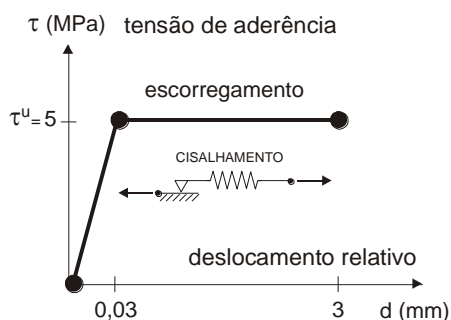


Figura 12 – Tipos de elementos finitos estruturais: comportamento e dimensão

Tabela 2 – Propriedades físicas dos materiais

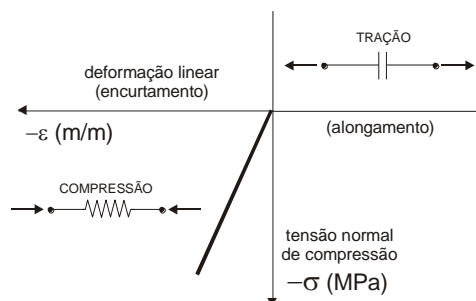
Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Poisson	Resistência à Compressão (MPa)	Densidade (kN/m ³)	Coef. Dilatação Térmica (°C ⁻¹)
Concreto	48600	0,2	30	24	0,00011
Concreto rolado	36000	0,2	20	24	0,00011
Poliuretano	0,4	0	0	0	0

COMBIN39: DELOCAMENTO NO PLANO DA INTERFACE PLACA/BASE



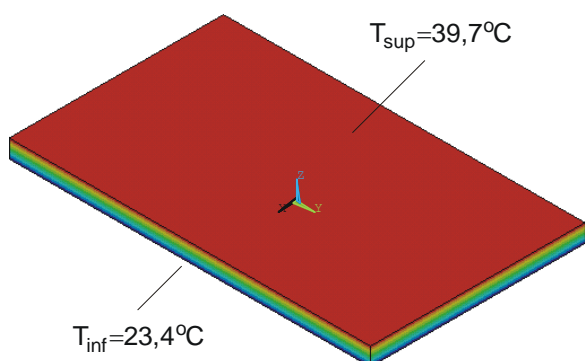
(a) Elemento finito de interface

LINK10: DELOCAMENTO NA DIREÇÃO NORMAL À INTERFACE PLACA/BASE

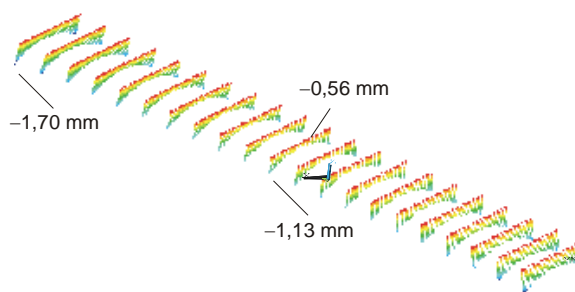


(b) Elemento finito de compressão

Figura 13 – Tipos de elementos finitos estruturais para a interface PLACA-BASE

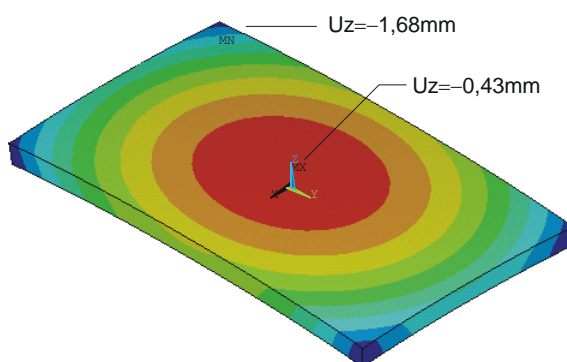


(a)

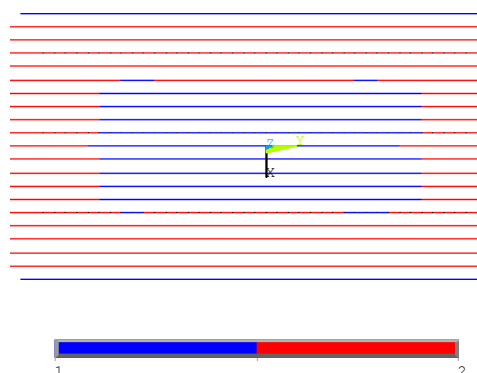


(b)

Figura 14 – (a) gradiente de temperatura imposto na placa de concreto; (b) deslocamentos verticais na sub-base (poliuretano)



(a)



(b)

Figura 15 – (a) Deslocamentos verticais na placa de concreto; (b) descolamento na interface

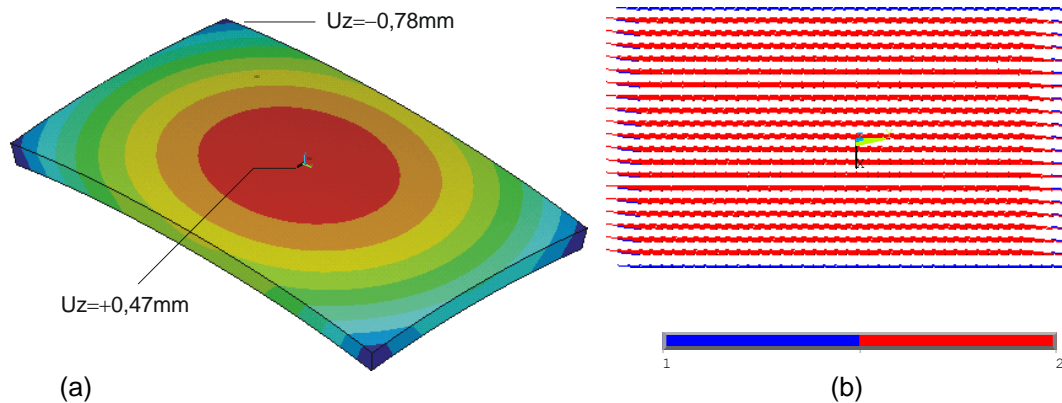


Figura 16 – (a) Deslocamentos verticais na placa de concreto desprezando-se o peso próprio dos materiais; (b) descolamento na interface placa-base: região do contorno mantém contato

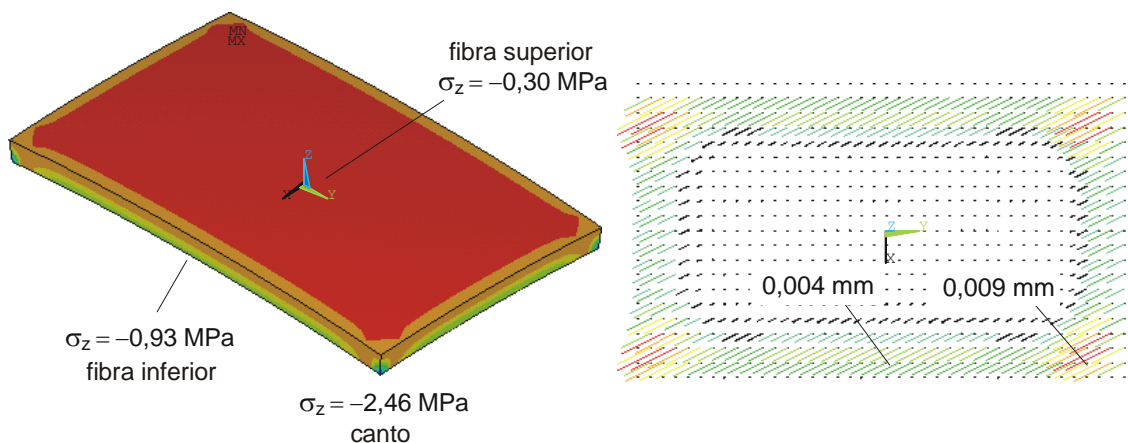


Figura 17 – (a) Tensões normais verticais na placa de concreto (b) Deslocamentos relativos na interface placa (concreto) e base (concreto rolado)

A figura 15(a) apresenta os deslocamentos verticais na placa. Observa-se que o deslocamento vertical no centro da placa é menor daquele estimado nos cantos, onde se pode nitidamente verificar o empenamento da mesma. A figura 15(b) apresenta em azul os pontos da placa que mantêm contato com a base, que se situam em todo o contorno e em uma região central. Fora destes pontos a placa perde contato com a base. Caso seja desprezado o peso próprio a placa somente se apóia no contorno da base, como pode ser observado na figura 16.

A figura 17(a) apresenta as tensões normais na placa, que são as mais significativas. Nestes termos a placa sofrerá compressão devido à ação conjunta do peso próprio e do gradiente térmico, não aparecendo a ocorrência de fissuras nem esmagamento do concreto. A figura 17(b) apresenta os deslocamentos relativos no plano da interface PLACA/BASE, que neste caso são muito pequenos, sendo máximos nas bordas e nos cantos.



4 Considerações Finais

Os dados apresentados, tanto da parte experimental como numérica, indicam o empenamento da estrutura quando, entre as faces da estrutura, ocorre um diferencial térmico. O descolamento da estrutura não foi observado no modelo físico para os diferenciais de temperatura que foram impostos sobre a placa. Isso ocorre devido à equalização do diferencial de temperatura que, inevitavelmente, ocorre durante o período de aquecimento, que no caso, foi de oito horas com radiação máxima de $1000,0 \text{ W/m}^2$.

No entanto, para o modelo matemático observou-se o descolamento da interface placa-base, da ordem de centésimos de milímetros, numa região excetuando-se a porção central e ao longo das bordas. A discrepância entre os resultados experimentais e numéricos deve-se ao fato de que os gradientes de temperatura sofrem alguma diferença em relação ao carregamento térmico ideal (instantâneo), sem os efeitos transientes, que se impõe ao modelo matemático. Outro fato, deve-se a deterioração ou inexistência de extensômetros elétricos nos pontos de descolamento identificados no modelo matemático. A simulação computacional capturou o comportamento real da placa em termos de deslocamentos e deformações. Esse resultado tem grande significado, pois poderá ser utilizado em situações reais em estruturas que estejam apoiadas sobre meio elástico, tais como: pavimentos rodoviários e aeroportuários, fundações rasas do tipo sapatas corridas, lajes de fundo de piscinas e lajes radiers em concreto armado e protendido.

A função do apoio intermediário rígido não influenciou nas medidas, pois atuou juntamente com a placa nos momentos de aquecimento e resfriamento. O apoio elástico, apesar de não ter sido testado outro material, é um parâmetro importante nas medidas de deslocamento e se comportando linearmente perante frente aos carregamentos impostos.

5 Referências

ANSYS.. **Theory Reference for ANSYS Release 11.0**. Canonsburg: ANSYS Inc., 2007.

ARMAGHANI, M. J.; LARSEN, J.T.; SMITH, L.L.. **Temperature response of concrete pavements**. Transportation Research Record, Washington, DC, n. 1.121, p. 23-33, 1987.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D.. **Análise numérica**. São Paulo: Thomson, 2003.

DAVIDS, W. G.; TURKIYAH, G. M.; MAHONEY, J. P.. EverFE: Rigid Pavement Three-Dimensional Finite Element Analysis Tool. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, DC, n.1.629, p. 41-49, 1998.

HARR, E. M.; LEONARDS, G. A.. Warping stress and deflections in concrete pavements. **Highway Research Board Proceedings**, Washington, DC, v. 38, p. 286-320, 1959.

IOANNIDES, A. M; DAVIS, C. M.; WEBER, C. M.. **Westergaard curling solution reconsidered**. Transportation Research Record, Washington, DC, n.1.684, p. 61-70, nov. 1999.



MAHBOUB, K. C.; LIU, Y.; ALLEN, D. L.. **Evaluation of temperature responses in concrete pavement.** Journal of Transportation Engineering, New York, v.130, n.3, p. 395-401, may/jun., 2004.

NISHIZAWA, T.; MATSUNO, S.. **Applicability of finite element method for mechanical analysis of concrete pavements.** Transactions of JSCE, v. 15, n.338, p.512-513, 1983.

RODOLFO, M. P.. **Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos.** 2001. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

RUFINO, D.; ROESLER, J.. **Effect of slab-base interaction on measured concrete pavement responses.** Journal of Transportation Engineering, New York, v.132, n.5, p. 425-434, may 2006.

SEVERI, A. A.; BALBO, J. T.. Gradientes térmicos em pavimentos de concreto nas condições de clima tropical. In: **CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 15.**, 2001, Campinas. Panorama Nacional da Pesquisa em Transporte. Rio de Janeiro: J. R. A Setti/O. F. Lima Júnior, 2001. v. 1, p.299-308.

SEVERI, A. A.. **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento portland no ambiente tropical.** 2002. 256 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

TANG, T.; ZOLLINGER, D. G.; SENADHEERA, S.. **Analysis of concave curling in concrete slabs.** Journal of Transportation Engineering, New York, v. 119, n.4, p. 618-633, july/aug. 1993.

WESTERGAARD, H. M.. **Stress in concrete pavements computed by theoretical analysis.** Public Roads, Washington, DC, v. 7, n. 2, p.25-35, 1926.

WESTERGAARD, H. M.. **Analysis of stresses in concrete roads caused by variations of temperature.** Public Roads, Washington, DC, v.8, n.3, p.54-60, 1927.