



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SOBRE O EMPENAMENTO TÉRMICO DE ESTRUTURAS RÍGIDAS

Fábio Raia¹

Alex Alves Bandeira²

Miguel Mattar Neto³

Antonio Gonçalves de Mello Junior¹

Alfonso Pappalardo Júnior¹

¹ Universidade Presbiteriana Mackenzie,
Rua da Consolação, 930 - CEP 01302-907 - Consolação - São Paulo - SP – BRASIL

² Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02 - CEP 40210-630 - Federação — Salvador - BA. BRASIL

³ 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 uma abertura "gap" entre duas camadas sobrepostas da estrutura rígida, mediante ao aquecimento superficial. Tal experimentação é baseada na hipótese que tensões de ordem térmica são capazes de arquear a estrutura ao 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.

Palavras-chave: *tensões térmicas; aquisição de dados; placa de concreto.*

1 INTRODUÇÃO

Uma estrutura com forte aplicação, cujo apoio se dá em meio elástico, é o pavimento de concreto. Apesar da grande aplicação na engenharia Civil, especificamente na área de transportes, exhibe uma característica interdisciplinar complexa abrangendo, ao seu redor, vários campos da Ciência. Além disso, o pavimento foi uma solução técnica aplicada às vias de transporte para proporcionar facilidades sociais, econômicas e humanas. E, sem dúvida, favoreceu a integração dos povos desde as primeiras construções que remontam ao Egito antigo.

O estudo do pavimento, como área de pesquisa, mostra uma história rica de métodos analíticos e empíricos desenvolvidos desde a década de 1920 até a simulação numérica, contando com recursos computacionais, dos anos 1990.

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 então 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 podem-se destacar as variações da temperatura, as deformações e as tensões. Essas informações têm, a partir de então, 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 *in situ*, 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 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, 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 1940 com a construção de pavimentos rodoviários e pistas de aeroportos. No entanto, as primeiras experiências com instrumentação começaram na década de 1970. 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), onde se buscou calibrar um modelo numérico com os dados oriundos do pavimento instrumentado

Esses estudos têm grande importância para a análise das falhas da estrutura, que podem ser do tipo funcional, quando o pavimento não produz segurança provocando solicitações de desconforto sobre os usuários dos veículos e do tipo falha estrutural, que está ligada à falência do revestimento em suportar cargas para as quais foi projetado. A previsão de ocorrência da falha é baseada na estimativa da vida útil do pavimento, pois espera-se que, dentro desse prazo, ele resista adequadamente.

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 interna a um laboratório e instrumentada com sensores de deformação, deslocamento, carga e de temperatura. O laboratório foi capaz de dar suporte a todas as exigências que o experimento necessitou.

Sendo assim, no sentido de acrescentar conhecimento e contribuir com maiores informações sobre o comportamento da estrutura, colocando-a em um estado quiescente, isolada de interferências de fatores externos, para obtenção de dados “limpos” de tensões, deformações e temperaturas, com controle absoluto sobre as condições de testes que venham a se adequar às diversas situações e condições utilizadas na fase de projeto, bem como, indiretamente, apresentar uma metodologia para testes acelerados, em laboratório, em placas de concreto com alternância do estado térmico.

2 EFEITO DA TEMPERATURA - EMPENAMENTO DE UMA PLACA RÍGIDA DE CONCRETO

A tendência de uma estrutura sofrer um empenamento devido a diferenciais de temperatura entre lados opostos é fato conhecido desde os primeiros estudos analíticos realizados por Westergaard (1927). Posteriormente, várias experiências práticas em placas rígidas foram conduzidas no sentido de medir deformações provocadas pelo empenamento ou, ainda, verificar a perda de contato com o apoio.

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, sendo esse último mais moderno, explorando a técnica dos elementos finitos. Uma descrição dessas abordagens e modelos 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), ela foi considerada estando sobre uma fundação elástica, com contato pleno entre ela e 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 $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($40,0\text{ }^{\circ}\text{F}$), 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, 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. Lee (1999), trabalhado com o conceito de placas finitas, observou tensões de empenamento para diferencial de temperatura em torno de $18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($33,0\text{ }^{\circ}\text{F}$).

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 de um *gap*, mesmo com uma sensível instrumentação realizada com sensores de deslocamento, *linear variable differential transformer* (LVDT), fixados nos extremos longitudinais da placa e do apoio. No presente trabalho, observações semelhantes foram feitas e concordam com as realizadas por Armaghani et al. (1987).

A existência de uma temperatura crítica, indicada por Tang et al. (1993), baseada na teoria de placas e relativa às soluções de Westergaard de uma placa rígida apoiada sobre uma fundação tipo Winkler, indica a ocorrência de um *gap* entre a placa e o apoio, ilustrado de forma exagerada pela Fig(1).

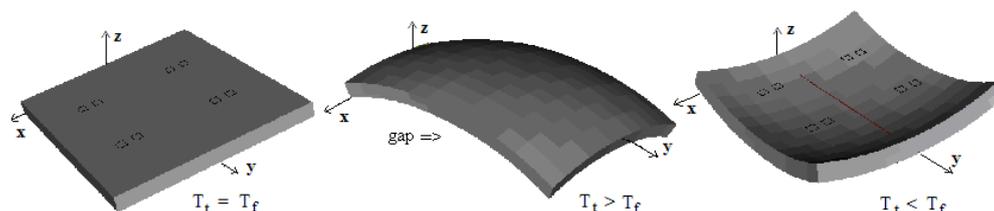


Figura 1. Vista isométrica do comportamento da placa sob ação de um diferencial de temperatura. Gerado a partir do software EverFE 2.24 (2009).

Em um trabalho experimental, Rodolfo (2001) indica que, devido ao peso próprio, uma placa de concreto não exhibe 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 *gap* no fundo da placa.

2.1 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 temperatura ambiente teve pouca influência durante os testes, servindo como condição inicial em todas as situações. Os testes foram realizados sempre com a umidade reinante, pois a mesma não foi controlada. O molde onde foi feita a estrutura serviu como isolante térmico evitando perdas de calor pelas laterais, principalmente por sua parte inferior. 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 \mathbb{R}^2 é definido como sendo a direção de um vetor que se projeta sobre o plano xoy e é denotado por:

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

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

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

Cuja quantidade $\frac{d\theta}{dx}$ é chamada de gradiente térmico que expressa a funcionalidade entre a temperatura e o fluxo de calor.

As grandezas de radiações: térmica emitida (pela estrutura), incidente, refletida, absorvida, convecção com o ambiente e a 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 não possuírem coeficiente de dilatação 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.

2.2 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 (h).	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

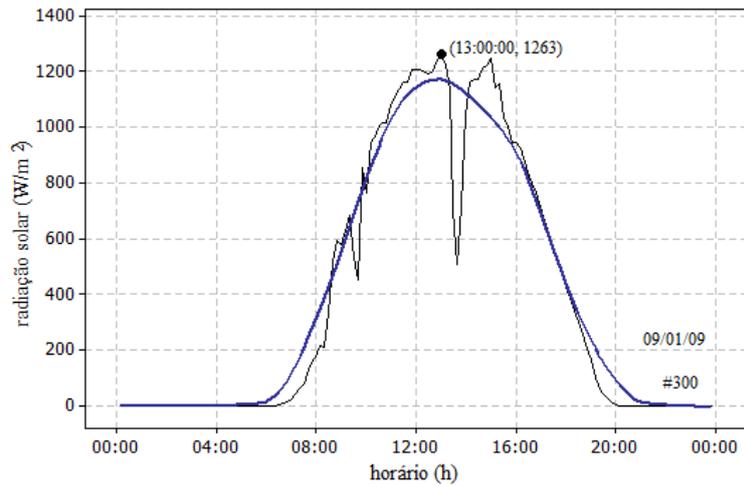


Figura 2. Distribuição da radiação solar dia 09/01/08. A linha cheia representa a tendência da radiação caso não fossem as ações de sombras causadas por nuvens.

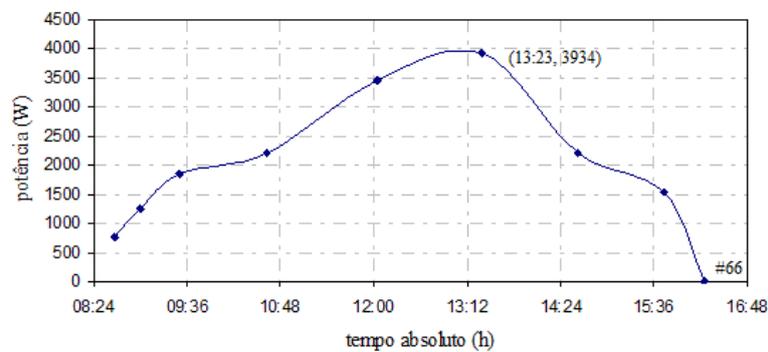


Figura 3. Potência dissipada pelo conjunto de resistências na plataforma de aquecimento.

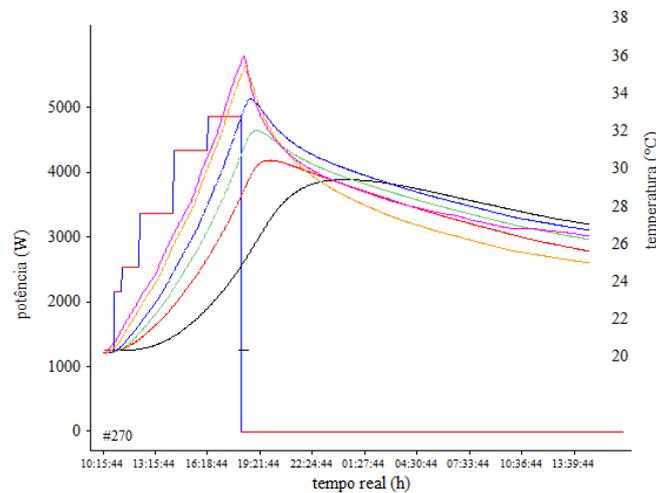


Figura 4. Ação do controle de tensão sobre o efeito da temperatura.

2.3 Instrumentação da estrutura

Para observar o empenamento da estrutura, foi colocada no centro da mesma uma célula de carga. 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; (b) a base da estrutura com a cavidade central para a colocação da célula de carga, e (c) 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 interconectando, mecanicamente, à célula por meio de uma haste de aço. A figura 6 traz a representação em corte transversal da estrutura, 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 através 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 vai sendo aquecida conforme Tabela 1 e, então, são medidos os valores das tensões, deformações, deslocamentos e das temperaturas em diversos pontos da estrutura.

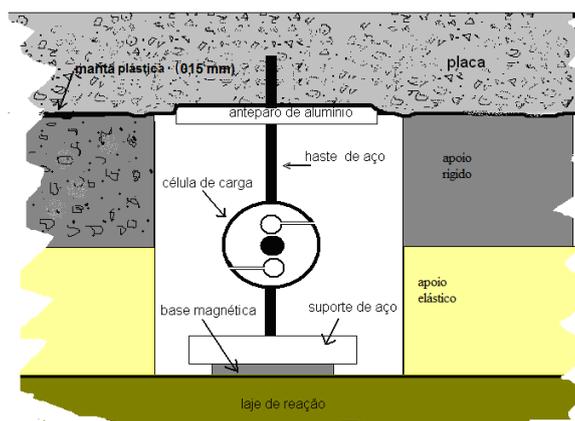


Figura 6. Corte transversal do poço, onde está localizado o sistema célula de carga e base magnética. Esse procedimento foi utilizado para detectar o empenamento da placa.

3 MODELAMENTO NUMÉRICO / EXPERIMENTAL

O modelamento numérico foi abordado com a finalidade de apresentar uma visualização do experimento realizado e estabelecer uma comparação entre os resultados experimentais e numéricos. A grande dificuldade na modelagem numérica é a real caracterização dos materiais frente às suas propriedades. Muitos modelos surgiram para “tentar” 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 modelamento é conhecido como 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 MEF, mostraram uma discrepância entre valores analisados de um sólido (placa) repousando em duas fundações diferentes, Winkler e tipo elástica. Comparou os resultados com valores medidos. Os resultados não foram compatíveis e, por causa disso, atribuiu as diferenças obtidas à falta de refinamento do método dos elementos finitos. Porém, há de se perceber, que o sucesso de um modelo está fortemente ligado à habilidade e conhecimento do projetista e ao desenvolvimento de novos elementos que “capturem” a realidade. Essas discrepâncias podem estar vinculadas à falta de capacidade que o ‘elemento finito’ tem 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 próximos da realidade para que o

modelamento seja o mais fiel possível. Para auxiliar o processo de interpretação e, aferição dos dados gerados pelo sistema de aquisição de dados, foi utilizado o software EverFE 2.24. Esse *software* 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. O software trata esse problema vinculando os nós da malha base com os nós da malha da placa.

3.1 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 do *gap*, 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 $-0,03^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ocorre a perda de suporte ao longo da borda da placa e que quando é pequeno ($-0,01^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ a $0,01^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) a placa está plenamente apoiada.

Esse comportamento se mostrou desde o início dos testes e perdurou em todos eles, mesmo para pequenos diferenciais de temperatura. Isso pode ser observado pelo 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 ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

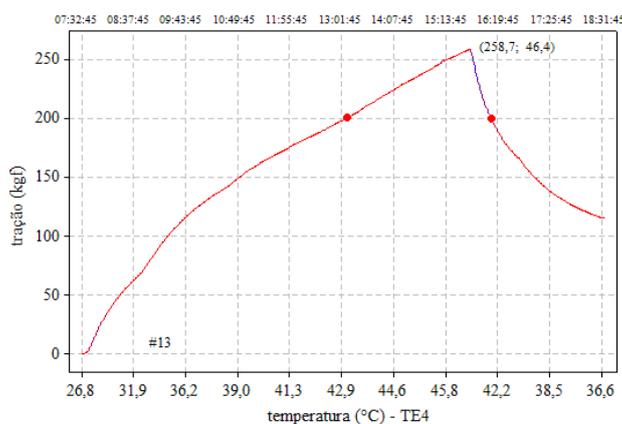


Figura 7. Comportamento de flexão da placa, devido à variação de temperatura.

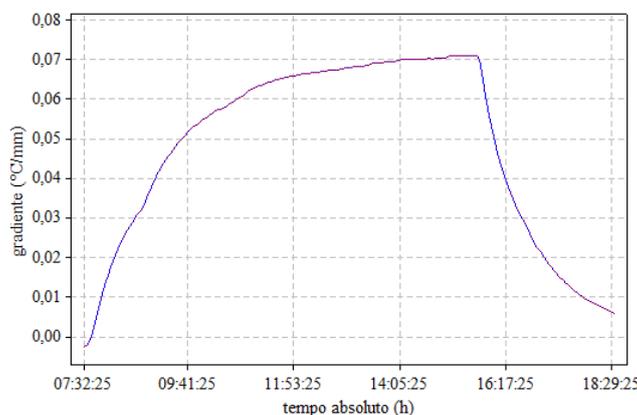


Figura 8. Gradiente térmico em função do tempo durante o processo de aquecimento da placa.

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 -27,4 N (-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.

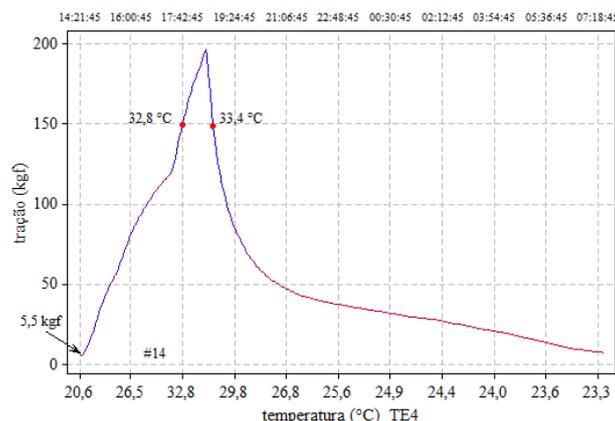


Figura 9. Comportamento tensional da placa, devido à variação de temperatura.

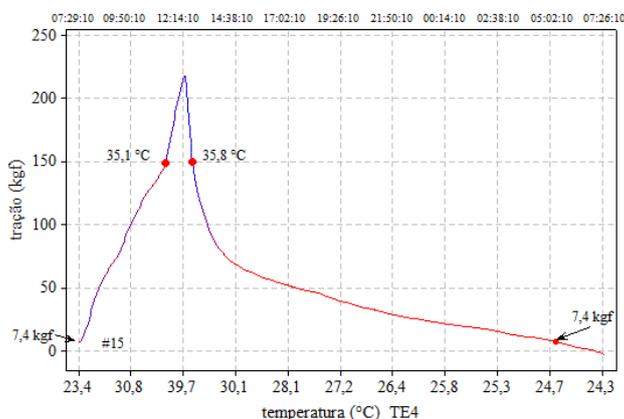


Figura 10. Comportamento tensional da placa, devido à variação de temperatura. Teste com ciclo de 24 horas.

4 MODELAGEM NUMÉRICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A placa analisada possuía dimensões de 1,78 m × 3,0 m × 0,15 m, vide Figura 11 Ela foi apoiada sobre duas outras camadas, cujas propriedades físicas dos materiais estão apresentadas na Tabela 2. A placa foi construída de tal forma a atingir a resistência de 30,0 MPa aos 28 dias e foi apoiada sobre uma base de cimento, cuja resistência aos 28 dias apresentou valor de 20,0 MPa e ambas apoiadas sobre um subleito de poliuretano.

Para a realização da simulação numérica, foi utilizado programa, ANSYS®, generalista, que utiliza o método dos elementos finitos. O programa fornece em sua biblioteca os elementos hexagonais isoparamétricos de oito nós, o Solid70 e o Solid185, para analisar a resposta não-linear do comportamento triaxial do concreto. O elemento Solid70 é utilizado na modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos para a análise térmica da estrutura. Para analisar a parte mecânica da placa de concreto é utilizado o elemento Solid185. Os dois elementos se comunicam, pois a análise possui campos acoplados. Cada elemento é hexagonal e possui oito pontos de integração. O elemento tem comportamento elástico linear até que as forças e tensões não sejam excedidas e requer um solver iterativo. A malha de elementos finitos foi discretizada com os elementos Solid70 e Solid185, possuindo 21840 nós e 18368 elementos. (BORBALO et al. 1989). Após a análise utilizando o método dos elementos finitos, os deslocamentos verticais do modelo foram plotados pelo programa ANSYS cuja apresentação pode ser vista na figura 12.

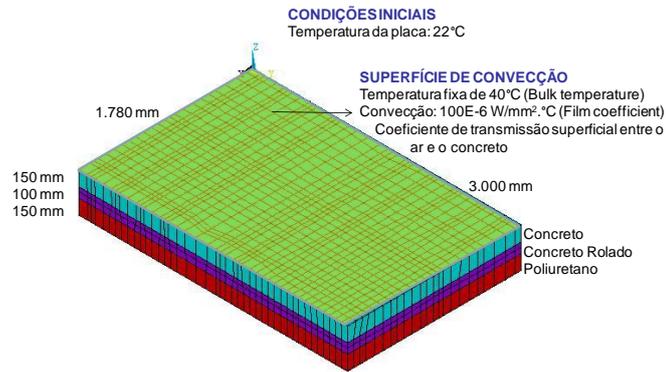


Figura 11. – Placa de concreto

Tabela 2 – Propriedades físicas dos materiais.

Material	Condutividade [W] / [°C . mm]	Coef. de expansão [1 / °C]	Calor específico [J] / [kg . °C]	Densidade [kg / m3]	Módulo de elasticidade [MPa]	Poisson
Concreto	8,00E-04	1,00E-05	1.000,00	2,40E-06	31.645,95	0,3
Concreto rolado	8,00E-04	1,00E-05	1.000,00	2,40E-06	24.825,12	0,3
Poliuretano	2,50E-05	1,00E-06	1.500,00	4,0E-08	4,70	0,3

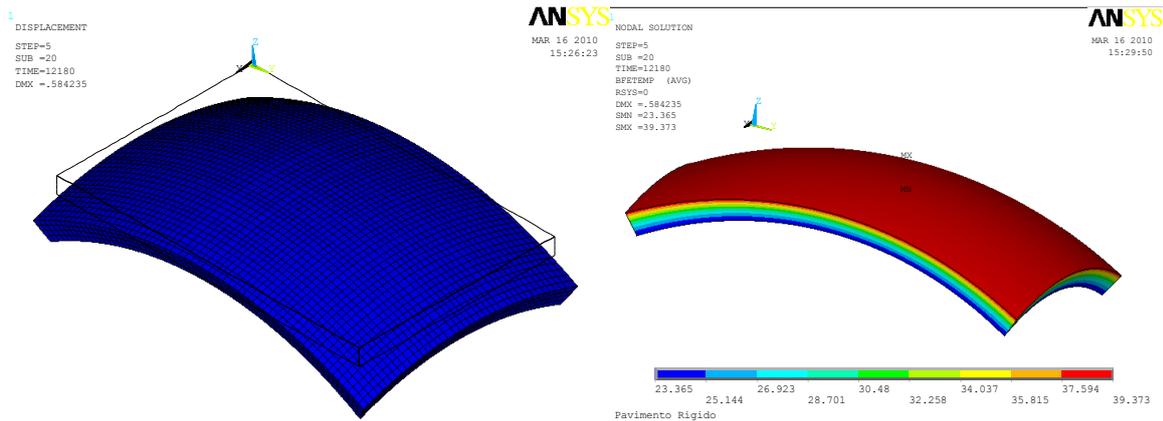


Figura 12. Placa de concreto em mm no incremento de carga 5 (escala ampliada $\times 700$): a) Configuração deformada; b) distribuição da temperatura.

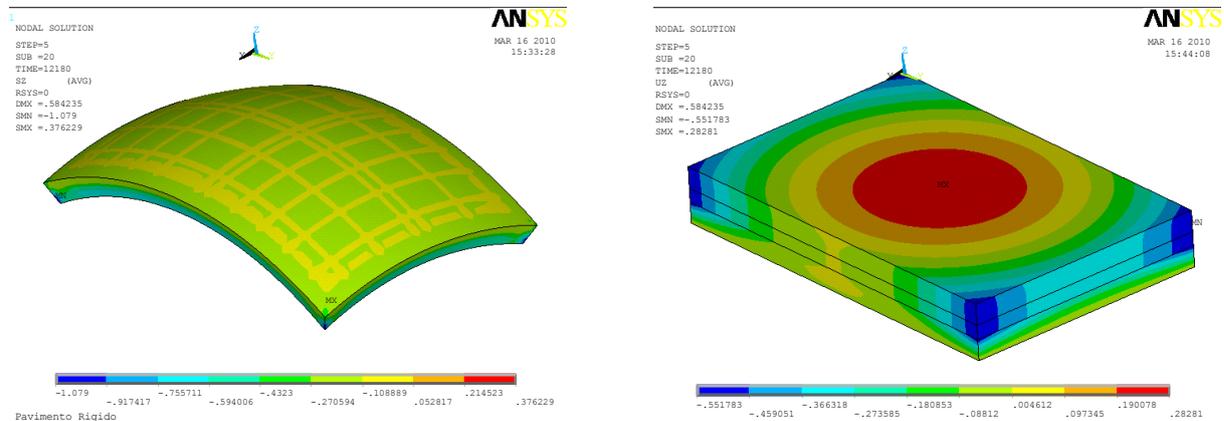


Figura 13. Placa de concreto em mm no incremento de carga 5 (escala ampliada $\times 700$): a) Tensão σ_z ; b) Deslocamentos na estrutura do pavimento.

A figura 13 mostra o aspecto em termos das tensões e deslocamentos onde, analisando o deslocamento de um ponto pertencente ao centro da superfície da placa apresenta-se o gráfico da figura 14. O ponto de ensaio foi escolhido na região central da estrutura.

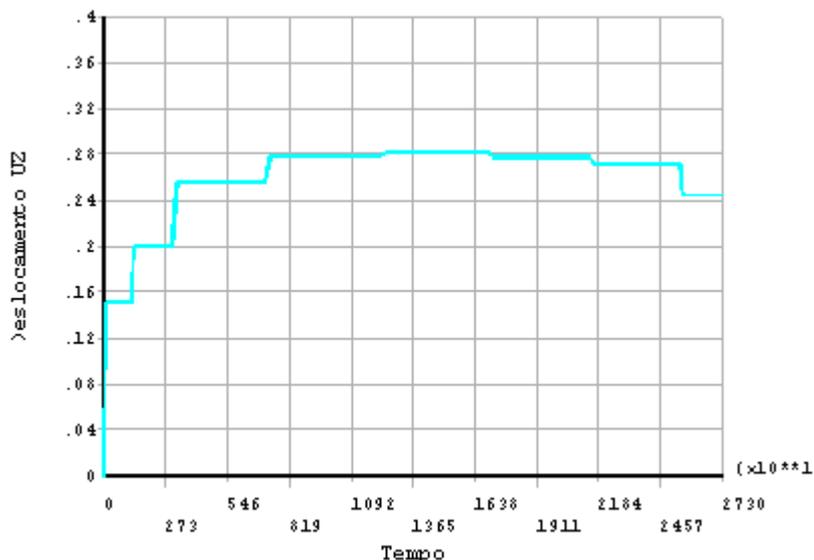


Figura 14. Placa de concreto em mm no incremento de carga 5 (escala ampliada $\times 700$): a) Tensão σ_x .

4 CONCLUSÕES

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 observada para os diferenciais de temperatura que foram impostos sobre a placa. Isso ocorre devido a equalização do diferencial de temperatura que, inevitavelmente, ocorre durante o período de aquecimento, que no caso, foi de oito horas com radiação máxima de $1000,0 \text{ W/m}^2$.

O processo de simulação conseguiu captar o comportamento real da placa em termos de deslocamentos e deformações. Esse resultado tem grande significado pois poderá ser utilizado em situações, cujas estruturas, estejam apoiadas sobre meio elástico.

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 comportando-se linearmente perante frente aos carregamentos impostos.

5 REFERÊNCIAS

- 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.
- BORDALO, S.N; FERZIGER, J.H. and KLINE, S.J. The Development of Zonal Models for Turbulence, *Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Vol.1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44, 1989
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. *Análise numérica*. São Paulo: Thomson, 2003.
- 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.
- LEE, Y. H. Tupav: stress analysis and thickness design program for rigid pavements. *Journal of Transportation Engineering*, New York, v. 125, n.4, p. 338-346, jul./aug., 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. 203f. 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. 256f. 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.

WALRAVEN. J. C. Fundamental analysis of aggregate interlock. *Journal of the Structural Division*, v.107, n.11, p. 2.245-2.270, nov. 1981.

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

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

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no presente trabalho.

Abstract:

The study presented in this work is dedicated to the thermal curling of concrete pavement supported uniformly in elastic medium. Among the most intriguing phenomena, we saw the one in which a structure has a convex arching 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, it has been constructed a rigid structure in two layers not adhering, resting on an artificial foundation. Every set was deposited on a slab of internal reaction in a laboratory that has offered technical resources to carry out the experiment. The obtained results were manipulated through numerical analysis by finite element method and compared with those obtained experimentally. In this light, the objective is to verify the existence of an opening gap between two overlapping layers of the rigid structure by the superficial heating. This experiment is based on the hypothesis that thermal stress are capable of bending the structure to the point of presenting the opening. The experiment was limited to superficial heating of low temperature. The monitoring of the phenomenon occurred automatically, through a system of acquiring signals that received information from a load cell positioned between the frame and slab reaction and a displacement sensor placed at the edges of the structure. According to results of numerical simulation, which indicates the existence of the gap, the experimental data have been showing that in certain situations the weight of the structure is beaten by a strong tendency that it has to heat curling.

Keywords: curling, thermal stress, data acquisition, concrete slab.