



## Estudo numérico e experimental de um pavimento submetido a diferenciais térmicos controlados

*Numerical and experimental study of pavements under thermal differentials controls*

Alex Alves Bandeira <sup>(1)</sup>, Fabio Raia <sup>(2)</sup>, Miguel Mattar Neto <sup>(3)</sup>

- (1) Professor, Departamento de Construção e Estruturas, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Rua Aristides Novis, 02 - Federação - CEP 40210-630 - Salvador, BA.  
Email: [alex\\_bandeira@terra.com.br](mailto:alex_bandeira@terra.com.br)
- (2) Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Email: [raia@mackenzie.com.br](mailto:raia@mackenzie.com.br)
- (3) Professor, Centro de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.  
Email: [mmattar@usp.br](mailto:mmattar@usp.br)

### Resumo

O projeto de um pavimento depende de alguns parâmetros, tais como, capacidade de suporte do solo e das camadas inferiores à placa cuja função é suportar cargas estáticas, dinâmicas e aquelas de origem térmica. O conjunto de camadas, as quais constituem a estrutura, podem ser consideradas nos modelos com comportamento elástico-linear, sendo as camadas: revestimento (placa), base (sub-base) e subleito caracterizados pelos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson. O presente trabalho tem como objetivo estudar as tensões e deformações de estruturas de pavimentos rígidos oriundos do efeito da temperatura. Para tanto, são realizados ensaios experimentais em laboratório através de um modelo físico-experimental de uma estrutura de pavimento rígido construído em escala distorcida. O pavimento foi instrumentado e composto por uma placa de concreto de cimento Portland (CCP) apoiado sobre uma base de concreto compactado com rolo (CCR) e sobre um subleito sintético de poliuretano expandido, formando assim, uma estrutura com três camadas. A temperatura foi introduzida através de resistências pré-instaladas sobre o pavimento. As informações de deformação e temperatura foram obtidas por um sistema automático de aquisição de dados. Todo conjunto foi construído sobre uma laje de reação para que as medidas de deformação não sofressem influência da deformação do subleito. O experimento contou ainda com uma célula de carga situada entre camadas para indicar o empenamento da placa quando submetida aos diferenciais de temperatura. O experimento foi modelado através do método dos elementos finitos pelo programa ANSYS utilizando o modelo de Winkler. e apresentado por um modelo numérico tridimensional de forma a representar de forma fiel o ensaio experimental. Os resultados de tensões e deformações obtidas numericamente foram confrontados com os experimentais. O experimento realizado com essa técnica, buscou calibrar um método numérico no sentido de fortalecer o projeto de pavimentos no que tange à durabilidade, implicando dessa forma, no custo de projeto, manutenção e conforto do usuário.

*Palavra-Chave: Temperatura, elementos finitos, concreto, pavimento.*

### Abstract

The design of a pavement depends on some parameters, such as the ability to support the ground and lower layers at the board whose function is to support static loads, dynamic and those ones of thermal origin. The set of layers, which constitutes the structure may be considered in models with linear-elastic behavior, and the layers: surface (plate), base (sub-base) and subgrade characterized by modulus of elasticity and Poisson coefficients. This work aims to study the stresses and deformations of structures of the rigid pavement, from the effect of temperature. Then, experiments are tested in laboratory using a physical model-experimental structure of a rigid pavement built in distorted scale. The pavement was instrumented and composed by a plate of Portland cement concrete (PCC) supported on a base with roller compacted concrete (RCC) and a synthetic polyurethane subgrade expanded, forming a structure with three layers. The temperature was introduced by pre-installed resistance on the pavement. The information of deformation and temperature were obtained by an automatic system of data acquisition. Every set was built on a slab of



**Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2009**  
Outubro / 2009

© 2009 - IBRACON



reaction to the measures of strain were not influenced by the deformation of subgrade. The experiment also has a load cell located between layers to indicate the warping of the plate when subjected to temperature differentials. The experiment was modeled by the finite element method program ANSYS by using the model of Winkler, and presented by a three-dimensional numerical model to represent the true form of experimental testing. The results of stresses and deformations obtained numerically were compared with the experimental ones. The experiment performed with this technique, has calibrated a numerical method to strengthen the design of pavements with regard to durability, resulting thus in the cost of design, maintenance and comfort of the user.

Keywords: Temperature, finite elements, concrete, pavement.



## 1. Introdução

A instrumentalização em pavimentos de concreto de cimento Portland vem sendo realizada desde antes dos primeiros testes controlados na pista da AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS (AASHO Road Test) em Ottawa, EUA na década de 50. O objetivo era, na época, verificar de forma prática os conceitos para projeto de pavimentos. Desde então, vários trabalhos foram realizados em pistas instrumentadas com a intenção de, não só entender o comportamento do pavimento, sob várias condições, como também propor novas metodologias e procedimentos de construção e validar modelos numéricos. Essas pistas foram e são, até hoje, construídas à semelhança de pistas comuns, podendo fazer parte de um pavimento de uso contínuo ou construídas em lugares reservados especialmente para testes e coletas de dados. Os testes realizados nessas pistas foram os mais variados, desde medidas de deformação sob carga estática ou dinâmica, diferentes composições de espessuras, diferentes bases até medidas de aderência entre o revestimento e a sub-base (AASHO, 1962).

A obtenção desses dados sempre foi problemática, devido o pavimento encontrar-se ao relento e submetido às intempéries naturais e muitas vezes distantes do local de análise; estradas, por exemplo.

No Brasil a aplicação do concreto, como uma estrutura para pavimentação, remonta da década de quarenta com a construção de pavimentos rodoviários e pistas de aeroportos. A primeira pista experimental, construída em São Paulo, foi feita na Universidade de São Paulo no ano de 2001, ocasião onde se buscou calibrar um modelo numérico com os dados oriundos do pavimento. Essa busca vinculada a um pensamento mecanicista, teve a finalidade de obter uma noção mais precisa do comportamento e desempenho da placa frente às várias solicitações que surgem durante a sua vida. Pesquisas dessa natureza visam a sua otimização, com relação à sua geometria, vislumbra a economia de material, tempo de execução e projeto.

Com relação aos aspectos técnicos – construtivos, utilizam-se, no Brasil, métodos e dimensionamentos oriundos de pesquisas realizadas nos Estados Unidos da América do Norte (EUA) pela AASHO e (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION) PCA, cujos critérios, em determinadas circunstâncias, clima, por exemplo, não se aplicam à realidade do Brasil (SEVERI, 2002). Porém, resultados de pesquisas vêm sendo incorporados aos procedimentos de projeto e, isso, pode ser visto, por exemplo, entre outras referências, pela IP-06 e IP-07 (instrução para projeto) da Secretaria Municipal da Infra-estrutura Urbana (PMSP, 2002).

A instrumentação em placas de CCP (concreto de cimento Portland) é a forma experimental mais adequada e mais objetiva para calibração de modelos numéricos. Cita-se como exemplo, o trabalho de Shoukry et al. (2007) que, por meio de pavimento instrumentado, um modelo 3DFE (modelo tridimensional em elementos finitos) foi validado segundo dados oriundos do campo. A medida de deformações e diferenciais de temperatura tem suas implicações vinculadas ao projeto de pavimentos, tanto que os métodos normalmente utilizados, não levam em consideração que os diferenciais de



temperatura podem ser significativamente maiores que a ação de cargas rodoviárias (SIDDIQUE et al. 2005).

O embutimento de sensores na massa fresca da placa de pavimento pode ser de vários tipos, os mais comuns são os strain gages, cuja característica é gerar informações sobre a resposta do pavimento em relação a cargas estáticas ou dinâmicas.

## 2. Problema Analisado

A pesquisa tem como objetivo estudar as variações de tensões e deformações de uma placa de concreto quando submetida às variações térmicas induzidas. Para a sua realização, o estudo foi conduzido em duas linhas, uma experimental e outra numérica.

Para a realização do estudo experimental, foi construída em laboratório a placa ilustrada na Figura 1. O dimensionamento utilizado foi o mesmo de um pavimento comum, encontrado em pisos industriais e pavimentos rodoviários. 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. O subleito é de poliuretano.

Os dados foram coletados por sensores acoplados à placa e foram embutidos seguindo a técnica especificada por Sargand et al. (1999). Na fase de pesquisa buscaram-se materiais que fossem resistentes aos processos mecânicos de embutimento e que, depois da construção dos sensores, eles deveriam possuir repetibilidade de transdução. Assim como, manterem a estabilidade durante o processo de concretagem e que mantivessem as características estáveis quando aos procedimentos de aquecimento e resfriamento da placa. A medição da temperatura interna na placa foi realizada por termômetros construídos tomando como base o termoresistor tipo PtT100 (sensor de resistência de platina) classe B. Foi necessário desenvolver um termômetro capaz de suportar a umidade inicial da massa de concreto garantindo a estanqueidade, isolamento e as solicitações mecânicas impostas pelas variações de temperatura.

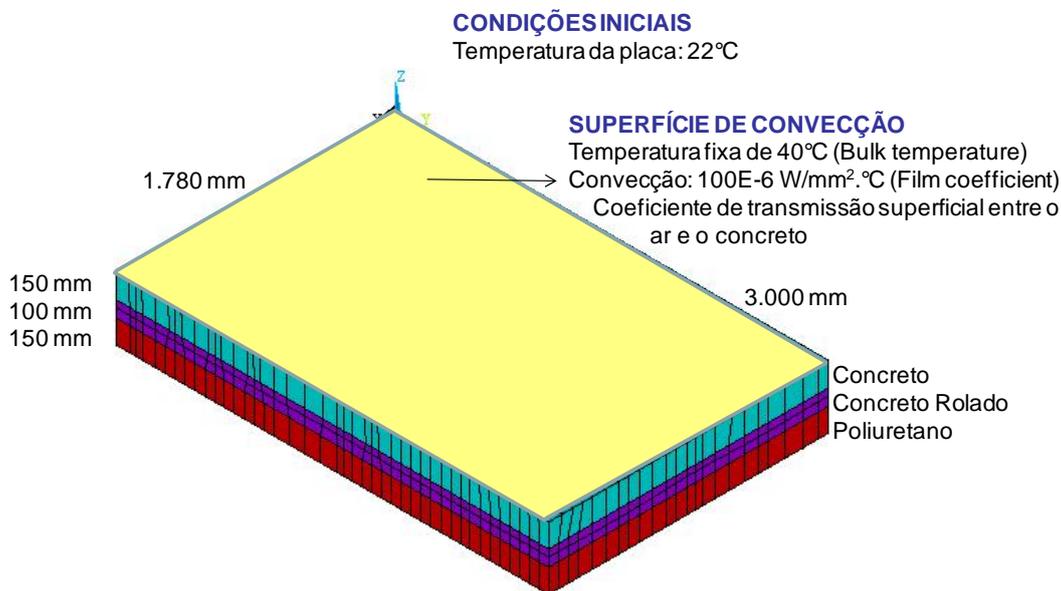


Figura 1 – Placa de concreto

A placa de concreto analisada é retangular de dimensão 1,78 m × 3 m × 0,15 m, vide Figura 1. Esta é apoiada sobre duas camadas, uma de espessura de 10 cm de concreto rolado e a outra de 15 cm de poliuretano. As propriedades físicas dos materiais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais.

Material	Condutividade (W/°Cmm)	Coef. de expansão (°C <sup>-1</sup> )	Calor específico (J)/(kg°C)	Densidade (kg/mm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (MPa)	Poisson
Concreto	8,0E-04	1,0E-05	1.000,0	2,4E-06	31.645,9	0,3
Concreto rolado	8,0E-04	1,0E-05	1.000,0	2,4E-06	24.825,1	0,3
Poliuretano	2,5E-05	1,0E-06	1.500,0	4,0E-08	4,7	0,3

Sobre a placa está colocada uma superfície de indução térmica atuada manualmente capaz de elevar a temperatura desde a temperatura ambiente até aquela especificada. As taxas de aquecimento são 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. Ao longo do tempo, a placa vai sendo aquecida e, então, são medidos os valores das deformações e das temperaturas em diversos pontos da placa de concreto. Ao longo do trabalho, os resultados experimentais serão confrontados com os numéricos.

### 3. Temperatura

A termodinâmica estuda as relações entre calor e trabalho e as propriedades das substâncias que interagem nestas relações.

O calor é a forma de energia que se transfere entre dois pontos, devido a uma diferença de temperatura entre eles.

O calor específico é a propriedade do fluido que mede a energia necessária para elevar de 1 K a temperatura de uma massa unitária de uma substância.

A energia interna relaciona-se com a troca de outras formas de energia entre uma substância que se encontra no interior de um volume de controle e o meio. A energia interna da água no estado líquido é numericamente igual a sua temperatura, na escala Celsius.

A primeira lei da termodinâmica refere-se ao princípio da conservação de energia que afirma que a somatória das energias que entram num volume de controle, menos a somatória das energias que saem, é igual à variação de energia que ocorre dentro do volume de controle.

A segunda lei da termodinâmica não impõe nenhuma restrição quanto ao sentido em que as transformações ocorrem. Afirma também que quando se deseja transportar calor de uma fonte fria para uma fonte quente, em uma máquina cíclica, necessita-se realizar um trabalho proveniente de uma fonte externa.

### 4. Análise experimental

A placa de concreto foi feita com um cimento classe C-20 (20 MPa) apoiada sobre a sub-base, vide Figura 2. As dimensões e propriedades dos materiais estão apresentadas na Figura 1 e na Tabela 1.



Figura 2 – Placa de concreto. (a) placa instrumentada, (b) Disposição do sistema de gerenciamento e aquisição de sinais.

As laterais do molde foram furadas para a passagem dos cabos dos sensores e um reforço foi realizado para evitar a deformação do molde. Os sensores foram depositados em lugares estratégicos e devidamente mapeados. A fixação dos sensores, tanto de deformação como de temperatura, foi realizada por meio de “cavaletes” de arame de aço de 1,0 mm de diâmetro. Os sensores foram fixados por meio de presilhas de plástico *tire up* (enforca gato ou *cabre ties*) no cavalete.

Os fios acoplados na placa foram conectados em um computador e foram coletados diversos dados de temperatura e deformação em vários pontos da placa.

Para a realização deste estudo, foram selecionados cinco pontos, cujas coordenadas x e y são 890,0 mm e 1500,0 mm, respectivamente, e coordenadas z apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos analisados.

Coordenada × Nó	N-10	N0	N4	N7	N11	N15
Z	-250	-150	-110	-80	-40	0
Nº Nó MEF	16103	3632	6688	6687	6686	6689

O ensaio experimental consistiu em ligar a superfície de indução térmica por aproximadamente 8 horas, considerando as condições iniciais apresentadas na Figura 1. Os dados foram coletados durante um período de 24 horas, desde o instante inicial quando foi ligada a superfície de indução térmica. Cabe salientar que os dados coletados no modelo experimental refletem o aquecimento da placa de concreto no período em que a superfície de indução térmica esteve ligada, assim como o resfriamento da placa após o desligamento da superfície de indução térmica. Os dados medidos estão apresentados na Figura 3.

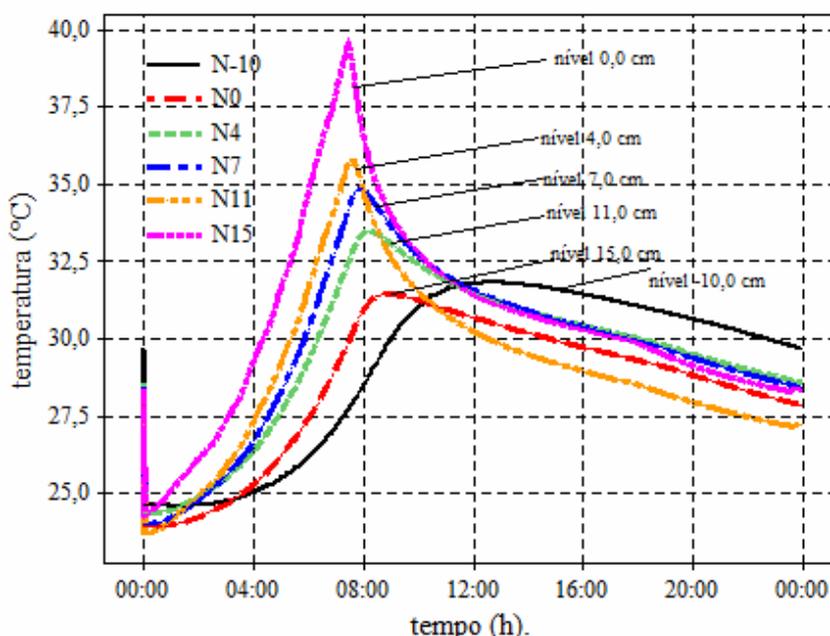


Figura 3 – Dados de temperatura coletados na placa de concreto

## 5. Análise numérica utilizando o método dos elementos finitos

Para a realização da simulação numérica, a placa foi simulada no programa generalista ANSYS. A malha de elementos finitos está ilustrada na Figura 1.

O programa ANSYS 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 estrutura é composta pela placa de concreto, por uma camada de concreto rolado e outra de poliuretano. A malha de elementos finitos é discretizada com os elementos Solid70 e Solid185, possuindo 21840 nós e 18368 elementos. O ensaio experimental foi rigorosamente modelado no programa ANSYS. Os dados obtidos numericamente estão apresentados na Figura 4.

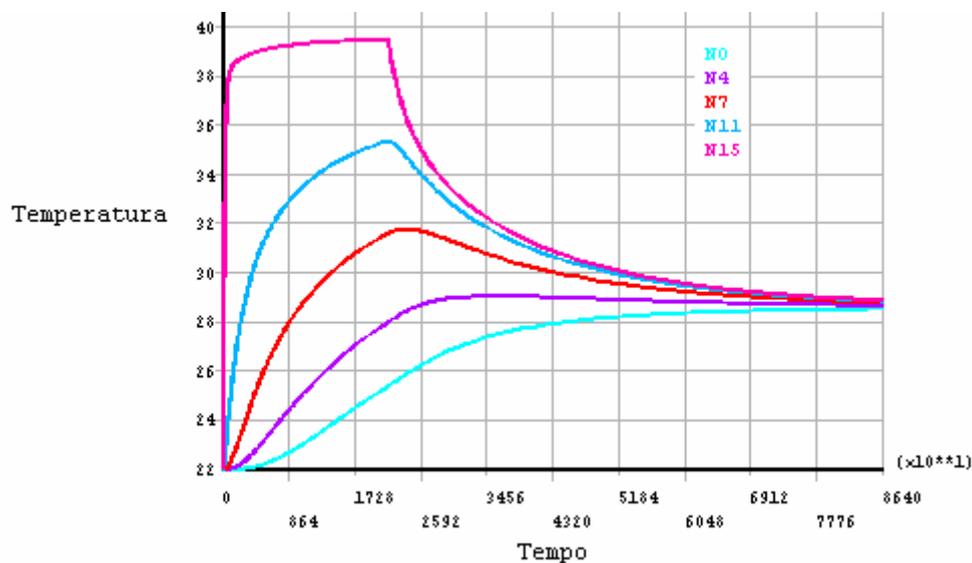


Figura 4 – Dados do comportamento da temperatura obtidos pelo modelo de elementos finitos

A Figura 5 ilustra a distribuição da temperatura na placa no instante inicial do ensaio.

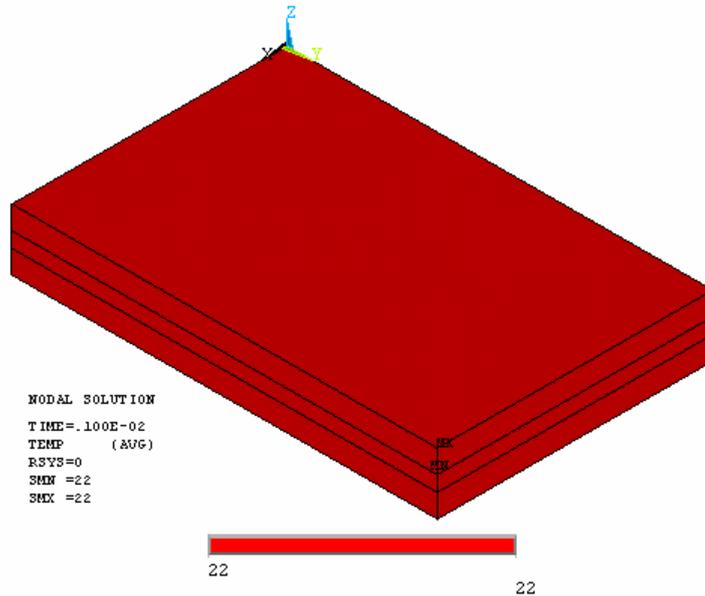


Figura 5 – Distribuição da temperatura na configuração inicial.

A Figura 6 ilustra a distribuição de temperatura na placa no instante em que a superfície de indução térmica é desligada.

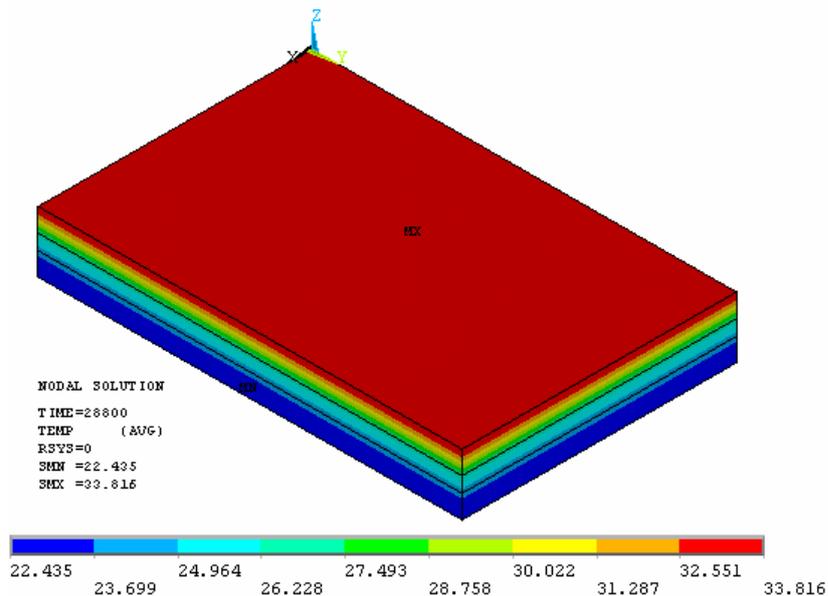


Figura 6 – Distribuição da temperatura obtida pelo MEF: Instante de 8 horas.

A Figura 7 ilustra a distribuição de temperatura no final do ensaio. Estes gráficos foram obtidos através da simulação numérica utilizando o método dos Elementos Finitos.

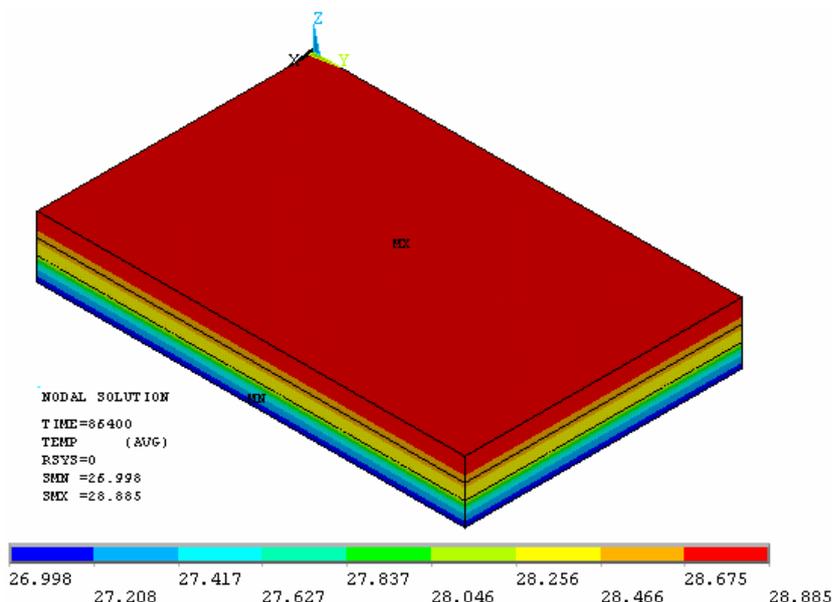


Figura 7 – Distribuição da temperatura obtida pelo MEF: Instante de 24 horas.

## 6. Conclusões

A instrumentação em placas de CCP têm sido o melhor meio para calibração dos modelos numéricos e as pesquisas, nesse campo, têm contribuído significativamente para o entendimento do comportamento de pavimentos sob carregamentos estáticos e dinâmicos. A instrumentação de pavimentos em local fechado (*in door*) vem ampliar e colaborar com novos dados o projeto e dimensionamento de pavimentos. A grande vantagem que esse método trás é a possibilidade de realizar testes repetidamente ou realizar testes acelerados de carga térmica, estática ou dinâmica. Por outro lado, a instrumentação *in door*, permite um acompanhamento mais próximo da experiência e, isso possibilita maior interação e dedicação do pesquisador. Outro aspecto que deve ser observado é aquele que se refere ao crescimento acadêmico quanto ao desenvolvimento de novas capacidades e técnicas. O processo de construção do pavimento proporcionou capacitação técnica para atender às exigências de manufatura dos sensores, bem como induziu a busca de métodos de teste e calibração mais apurados, segundo normas nacionais e internacionais. Os sensores mostraram-se robustos e não pereceram após um ano embutidos na placa.

Comparando os resultados numéricos com os experimentais, observou-se um comportamento equivalente nos gráficos apresentados (Figura 3 e Figura 4). Como a superfície de indução térmica foi colocada acima da placa de concreto, obviamente, os pontos localizados próximos à superfície do pavimento obtiveram temperaturas mais elevadas que os pontos localizados em posições mais profundas. Nas primeiras oito horas houve o aquecimento do pavimento e nas dezesseis horas restantes houve o resfriamento, até que este obtivesse uma temperatura de equilíbrio na ordem de 29,0°C. Estas informações podem ser claramente observadas na Figura 3 e na Figura 4. A única diferença observada entre estes gráficos é na curvatura das curvas dos pontos



**Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2009**  
Outubro / 2009

© 2009 - IBRACON



localizados próximo à superfície do pavimento na fase de aquecimento do pavimento. Em algumas referências na literatura, a subida da temperatura tem o formato ou características parecidas com gráfico apresentado na Figura 3. No ensaio experimental existe um componente de resfriamento em conjunto com o aquecimento e este fato, pode ser a causa desta "diferença". Cabe salientar, que experiências anteriores mostram o mesmo comportamento obtido no ensaio experimental. Por outro lado, a variação temporal da temperatura diária varia conforme o formato da curva de aquecimento no N15.

Nos próximos experimentos, novos condicionadores deverão ser adquiridos para obtenção de uma quantidade maior de dados. Será necessário um condicionador para uma célula embutida e aderida, para obtenção dos dados de deformação e, vinculada a essa célula, uma outra célula, embutida e não aderida, sensível apenas à variação de temperatura. Esse procedimento visa tornar a aquisição independente da variação da temperatura.



## 7. Referências

AASHO Road Test Report 5, **Pavement research**, Ed. The Highway Research Board, NAS-NRC Division of Engineering and Industrial Research Special Report 61E. Publicação nº 954, 1962.

PMSP. **Secretaria de infraestrutura, Instrução de projeto**, disponível na Internet via [www](http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/infraestruturaurbana/pavimentacao_comunitaria/normas/0001),  
[http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/infraestruturaurbana/pavimentacao\\_comunitaria/normas/0001](http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/infraestruturaurbana/pavimentacao_comunitaria/normas/0001), 2002, arquivo capturado em 18/01/07.

SARGAND. M. S.; KHOURY. I. S. **Sensor installation in rigid pavement**. Experimental Techniques, vol. 23, nº 3, may/jun. 1999.

SEVERI, A. A. **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical**. São Paulo, Tese doutorado, Escola Politécnica, 256 p, 2002.

SHOURY, S, N., FAHMY, M., PRUCZ, J., WILLIAM, G. **Validation of 3D Analysis of Rigid Pavement Dynamic Response to Moving Traffic and Nonlinear Temperature Gradient Effects**. International Journal of Geomechanics, ASCE, jan-feb, 2007.

SIDDIQUE, Z., HOSAIN, M., MEGGERS, D. **Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement**. Proceedings of the 2005 Mid- Continent Transportation Research Symposium, Iowa State University, Iowa, 2005.