

## **CALIBRAÇÃO DE TENSÕES EM PAVIMENTOS DE CONCRETO SIMPLES COM BASE EM MEDIDAS FÍSICAS EM PISTAS EXPERIMENTAIS**

**José Tadeu Balbo**  
**Marcos Paulo Rodolfo**  
**Deividi da Silva Pereira**  
**Andréa Arantes Severi**

Laboratório de Mecânica de Pavimentos  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

### **RESUMO**

Provas de carga dinâmicas foram realizadas sobre pavimentos de concreto simples devidamente instrumentados para o registro de deformações e cálculo das tensões resultantes no concreto. Empregando-se técnicas de elementos finitos as tensões esperadas exatamente nas posições centrais dos instrumentos de medida de deformações foram calculadas, permitindo a comparação entre tensões esperadas e reais. Considerando a variabilidade dos parâmetros elásticos do concreto, as simulações numéricas mostraram-se razoáveis para a predição de tensões no concreto, sendo as tensões aferidas em pista inferiores àquelas calculadas. As análises permitiram estabelecer um fator de correção entre as tensões medidas e calculadas.

### **ABSTRACT**

Slabs of Portland cement concrete instrumented with strain gages were loaded by single axles allowing the measurement of strains due to the moving load. Through finite element simulation, the expected stresses in the concrete were computed exactly at the centers of such field strain gages, making it possible to compare actual stresses and the forecasted ones. Results show good reliability for the employment of numerical analysis for computing stresses if it is taken into account for concrete characteristics variability, with no under design risks, since field stresses have shown to be smaller than the predicted ones for any case in the experiments; eventually is presented the conversion factor for stresses.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos de concreto simples normalmente empregados em projetos viários (PCA, 1966; PCA, 1984), embora não sejam oficiais nem aprovados oficialmente por agências rodoviárias no Brasil, procuram definir valores de tensão de tração na flexão aos quais estariam sujeitas as placas de concreto, devidas exclusivamente à ação de cargas de veículos; o método alternativo, de natureza empírica, embora em sua mais recente edição (AASHTO, 1998) incorpore explicitamente as condições ambientais, que por sua vez também impõem tensões nessas estruturas, tem sua aplicabilidade praticamente nula em zonas inter-tropicais.

Na tentativa de validação de métodos de projeto bem como do emprego de modelagem teórica para o cálculo de tensões no concreto torna-se indispensável a calibração dos modelos analíticos ou numéricos, confrontando suas respostas com as respostas que realmente ocorrem em pista, quando atuam as cargas do tráfego e ambientais. Barenberg e Zolliger (1990) já apresentavam resultados de pesquisas em pista buscando objetivos desta natureza tendo em vista os modelos desenvolvidos na Universidade de Illinois (programa ILLI-SLAB de elementos finitos). Este tipo de preocupação não é apresentada, nem mesmo implicitamente, no modelo de cálculo de tensões oferecido pela PCA (1984), quando foram oferecidas para projetos de pavimentos de concreto, sob a forma de tabelas e ábacos, equações numericamente modeladas com base em um programa de elementos finitos (Packard e Tayabji, 1985).

A validação de um método de dimensionamento de pavimentos se faz, em um primeiro momento, pela validação das respostas estruturais fornecidas pelas equações de cálculo tendo em vista as

respostas estruturais físicas ou reais obtidas em pista; nesta direção, a instrumentação de pistas experimentais é considerada uma atividade fundamental na evolução tecnológica de critérios de projeto, pois somente por meio da mesma se fazem possíveis tais comparações. Evidentemente, não basta tal atividade; é necessária monitoração de médio e longo prazo para que sejam também confrontados os padrões de desempenhos observados em pista com aqueles previstos pelos modelos de previsão adotados como premissa de projeto (no caso de pavimentos de concreto, fadiga por fissuração é um deles). Tal tipo de validação a curto prazo será mais confiável quanto maior for o controle exercido sobre as variáveis dos materiais e dos carregamentos durante os trabalhos de análises de respostas estruturais em pista.

Embora a natureza reconheça, como resposta estrutural, essencialmente as deformações, engenheiros de projeto são escolados em trabalhar com parâmetros fictícios, como momentos fletores ou tensões, uma vez que, especialmente no concreto, trata-se de algo corriqueiro e de simples execução a aferição da resistência à flexão do material. Inclusive, nos métodos de dimensionamento convencionais, os autores procuram sempre explicitar valores de tensões impostas nas camadas, denotando uma preferência nítida em pautar suas análises por parâmetros mais comumente empregados pela Resistência dos Materiais do que pela Ciência dos Materiais, como é o próprio caso do uso do valor da resistência “de engenharia”, sem consideração do estreitamento de uma seção transversal do material durante a determinação do diagrama força *versus* deformação.

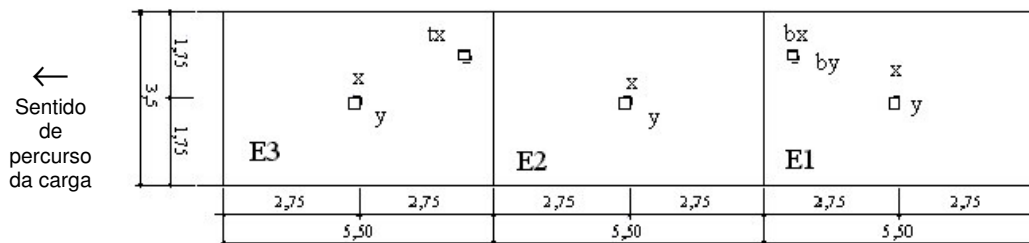
Nesta linha, sucessivamente, Rodolfo e Balbo (2002) e Balbo e Rodolfo (2003), propõem uma série de modelos (sob a forma de equações com coeficientes estatisticamente definidos) para cálculo de tensões críticas de tração na flexão (portanto também empregando valores de engenharia), com emprego do programa ILSL2 (Kazanovich e Ioannides, 1993), sem que se fizesse então menção a qual seria a relação entre as tensões calculadas por tais modelos com as tensões que provavelmente ocorreriam em pista. Tais modelos, em termos de respostas de tensões, desconsiderado o gradiente térmico presente na placa de concreto, mostraram-se na prática idênticos ao cálculo de tensões oferecido pelo critério da PCA (1984), como discutido em Balbo e Rodolfo (2003).

Todavia, seriam tais modelos conservadores ou não? Demonstrou-se, apenas, como se referiu, que tais modelos resultam em valores de tensão semelhantes ao modelo da PCA (1984), desprezados os diferenciais térmicos (Balbo e Rodolfo, 2003). Neste artigo, os autores apresentam uma análise de dados obtidos em dois pavimentos experimentais com concreto simples, sobre os quais foram realizadas provas de carga dinâmicas e, encontrando-se instrumentados, foram registradas as deformações do concreto para posterior comparação entre as deformações ou tensões esperadas (calculadas numericamente ou de projeto) e aquelas aferidas em pista. Desta forma, é possível apresentar fatores de calibração entre as medidas reais e aquelas normalmente empregadas em projeto, esclarecendo melhor a natureza de tais modelos.

## **2. PAVIMENTOS EXPERIMENTAIS INSTRUMENTADOS**

Duas áreas de testes de pavimentos de concreto simples foram empregadas para o estudo. A primeira, construída em 1999, no campus da USP em São Paulo, é detalhadamente descrita por Balbo et al (2000). Desta pista experimental, tomou-se a seção E (Figura 1) para as provas de carga. Nesta seção o pavimento é composto por placa de concreto simples com 250 mm de espessura e base de BGS com 100 mm de espessura sobre solo argiloso (aterro) com módulo de reação do subleito da ordem de 45 MPa/m. Análises do concreto empregado indicaram resistência à tração na flexão média de 5,3 MPa e módulo de elasticidade de aproximadamente 26 GPa. Na Tabela 1 são

apresentadas as posições precisas dos strain-gages (SG) na pista experimental da USP, conforme indicados na Figura 1.



**Figura 1** Placas de concreto na seção E da pista experimental na USP (x, y, bx, by e tx são as posições de strain-gages; tx é instrumento no topo da placa e bx e by são instrumentos no fundo).

**Tabela 1** Posição do centro do SG nas placas de concreto da seção E

Placa	Posição	Código do SG na direção x	Posição (x,y) do SG a partir do centro da placa (mm)	Distância entre SG e o fundo da placa (mm)	Código do SG na direção y	Posição (x,y) do SG a partir do centro da placa (mm)	Distância entre SG e o fundo da placa (mm)
E1	Centro	E1x	0 , 186	20	E1y	213 , 0	20
E1	Canto	E1bx	360 , 1460	20	E1by	579 , 1000	20
E2	Centro	E2x	0 , 197	20	E2y	193 , 0	20
E3	Centro	E3x	0 , 210	20	E3y	215 , 0	20
E3	Canto	E3tx	260 , 1350	230	-	-	-

O segundo experimento, construído em julho de 2000, tratou-se de acesso à fábrica de cimentos Santa Helena, em Votorantim (SP), sendo que suas placas de CCP foram instrumentadas conforme apresentado na Figura 2. O pavimento de concreto simples possui neste caso 230 mm de espessura, assente sobre base de concreto compactado com rolo (CCR) com 100 mm, tudo sobre o antigo pavimento asfáltico existente (*whitetopping*). Empregou-se, neste caso, a técnica de aplicação de emulsão asfáltica de ruptura rápida sobre o CCR imediatamente após sua compactação; contudo, o CCP foi lançado apenas cerca de um mês após, e como havia tráfego de obra sobre o CCR, a película de emulsão, no local da instrumentação, já não existia (era exatamente a entrada do Centro Administrativo da Votorantim). Isto poderia causar a aderência entre o CCP das placas e a base em CCR, o que fatalmente resultaria em baixas deformações na altura inferior do CCP, onde os SG haviam sido colocados. Os valores médios de módulos de elasticidade do CCP e do CCR foram estimados em 28,9 GPa e 19,2 GPa, respectivamente (ABNT, 2003).

As provas de carga ocorreram na seguinte ordem: (1) em 30 de outubro de 2000, com caminhões deixando a fábrica de cimento carregados, sem controle explícito de cargas; (2) em 11 de novembro de 2000, no campus da USP, logo pela manhã (6h), quando o diferencial térmico verificado era nulo, com um caminhão caçamba com eixo traseiro pesando 83,6 kN e pressão nos pneus de 638 kPa, quando durante os testes a borda externa da roda do eixo traseiro foi posicionada a 0,68 m da borda longitudinal da placa, no sentido de caminhamento indicado na Figura 1, com veículo se



caminhões saíam carregados da fábrica, são considerados com possíveis cargas entre 100 e 110 kN nesta análise, ou seja, pouco além da carga máxima legal. Todavia, o resultado mais marcante dos testes foi exatamente os baixos níveis de tensões aferidos no CCP, o que são devidos a dois fatos interpretados conjuntamente: primeiramente, tais níveis de tensão resultavam tão baixos que era de se julgar que placa de CCP e base de CCR estivessem aderidos, conforme suspeita já mencionada; por outro lado, deveria ser levado em conta que, os caminhões operando sobre a placa em trecho ascendente em curva à esquerda, encontravam-se com os eixos traseiros operando a distância de um metro da borda longitudinal externa da placa, como aferido visualmente durante os ensaios.

**Tabela 2** Tensões de Tração na Flexão em Pista (calculadas) – Votorantim (Out/2000)

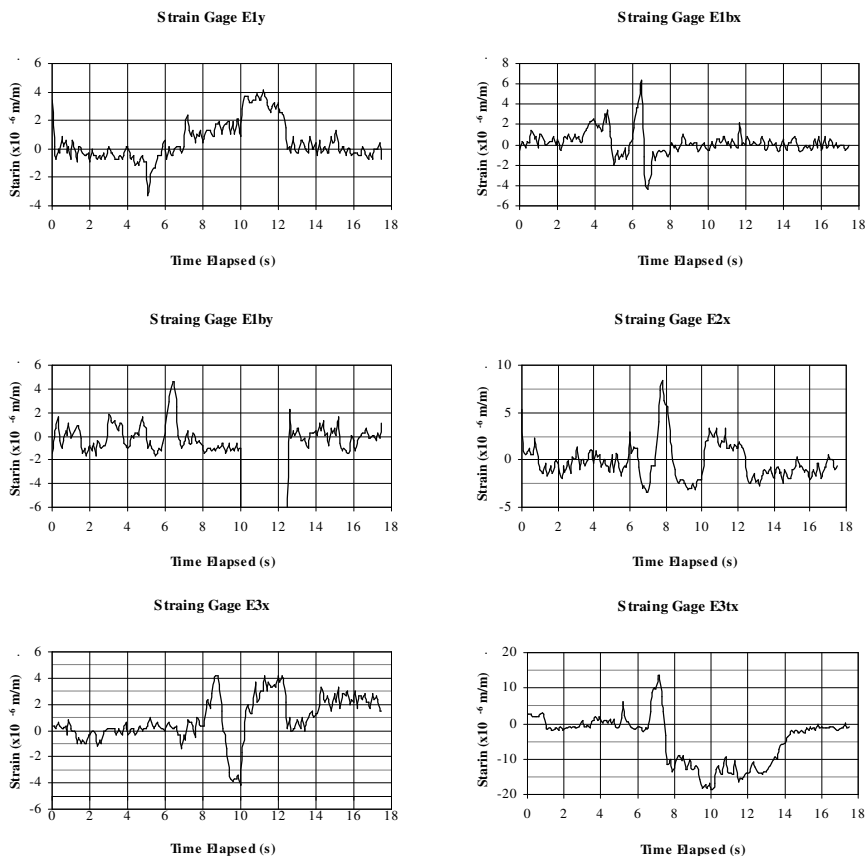
Prova de Carga	Tipo de Eixo	Posição do SG (numeração)	Máxima Tensão de Tração na Flexão no teste (MPa)
1	ESRD	1	0,15
	ETD		0,13
2	ESRS	1	0,10
	ESRD		0,19
	ETT		0,13
3	ESRS	1	0,16
	ETD		0,32
4	ESRS	1	0,13
	ESRD		0,29
	ETT		0,16
5	ESRS	1	0,11
	ETD		0,15

**Tabela 3** Deformações de Tração Aferidas em Pista - USP (Nov/2000)

SG	Deformação média aferida ( $\mu\epsilon$ )
E1x	13,02
E1bx	6,26
E1y	-3,32
E1by	4,65
E2x	8,41
E3tx	18,30
E3x	4,18

**Tabela 4** Tensões de Tração na Flexão em Pista (calculadas a partir de deformações medidas de rosetas de strain-gages) – Votorantim (Dez/2002)

Prova de Carga	Tensão de Tração na Flexão no teste (MPa)	
	1A	1B
1	-0,92	-1,04
2	-0,52	-0,52
3	-0,78	-1,04
4	-1,05	-1,30
5	-1,05	-1,04
6	-0,78	-0,78
7	-1,31	-1,04
8	-1,04	-1,05
9	-0,78	-0,92
10	-0,78	-1,05



**Figura 3** Registros deformação x tempo em alguns SG da seção E durante testes

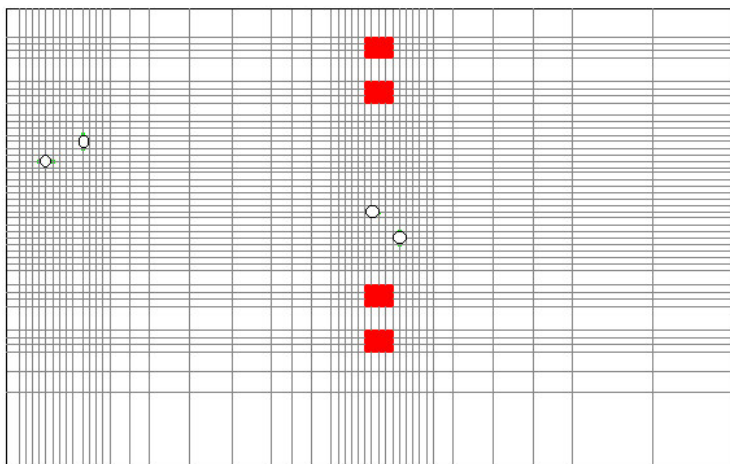
A contra prova, baseada em dados fisicamente medidos, só viria com a instalação de SG de contato na superfície da placa, o que somente ocorreu em dezembro de 2002, quando os SG de imersão originais já não operavam corretamente (provável fadiga dos instrumentos sob ação de um tráfego de 400 caminhões diários). No entanto, as tensões de compressão no topo da placa, calculadas a partir das deformações na roseta, indiretamente permitiram analisar e esclarecer os resultados obtidos para a prova de carga de outubro de 2000, como se verá adiante. Quanto à prova de carga na USP em novembro de 2000, os resultados aparentemente corroboravam níveis de tensão baixos para a condição do teste (carga de 83 kN sobre placa de CCP de 250 mm de espessura).

### 3. MÉTODO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS TESTES REALIZADOS

Com base em todas as características e propriedades das pistas experimentais investigadas, bem como conhecendo detalhadamente as cargas e pressões aplicadas sobre os pavimentos durante os testes realizados, era possível uma simulação numérica mais refinada, objetivando-se a determinação de deformações e tensões nas placas de concreto estudadas, exatamente nas posições dos SG, o que viabilizaria a comparação de resultados gerados por elementos finitos com os valores

fisicamente obtidos em pista (a partir das deformações reais sofridas). Para tal meta ser atingida empregou-se o programa ILSL2 (Kazanovich e Ioannides, 1993), quando o refinamento das malhas de elementos finitos foi processado a partir das rodas dos caminhões seguindo uma representação gráfica de uma falsa elipse, critério esse anteriormente empregado na formulação do método da PCA (1984). O processo de discretização de malha empregado sempre procurou a otimização do desvio relativo entre valores de tensões sucessivamente calculadas, conforme descrito por Bathe (1982).

Na Figura 4 é apresentada a malha de elementos finitos selecionada, finamente discretizada, para contemplar uma análise de deformações e tensões acurada nos pontos desejados, onde os SG estão instalados em pista. As áreas escuras no desenho representam as quatro rodas do ESRD, em sua real posição de carga durante o teste específico, e os pequenos círculos representam os centróides dos SG. As deformações e tensões assim calculadas eram representativas exatamente para as posições em planta e em profundidade da placa dos SG, conforme exemplo apresentado, tomada uma distribuição linear de deformações e tensões ao longo da espessura da placa de CCP.



**Figura 4** Malha empregada para a análise da prova de carga sobre a placa E1 (USP)

Evidentemente, os parâmetros elásticos empregados para as simulações seguiram os valores médios observados nos testes de laboratório e de campo, no que tange módulos de elasticidade de placa de concreto, de base e módulo de reação do subleito.

#### **4. RESULTADOS OBTIDOS E SUA COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EM PISTA**

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da simulação numérica da prova de carga na pista de Votorantim, considerada a condição de carga junto à borda (como no teste de dezembro de 2002) bem como aquela de um eixo posicionado a um metro da borda longitudinal. O eixo simulado foi aquele ESRD com 118,7 kN de carregamento e pressão de 633 kPa nos pneumáticos, para condição de base aderida à placa de CCP. Os valores em **negrito** são aqueles para os quais existem resultados de provas de carga. Observando-se tais valores numéricos, pode ser inferido dos mesmos os seguintes comentários e reflexões:

- Nas medidas de tensões de compressão na flexão (superfície junto à borda longitudinal, em dezembro de 2002), as medidas de campo (dois SG na Tabela 4), resultaram na média equivalente a 0,9 (SG 1A) e 0,94 (SG 1B), com coeficientes de variação respectivamente de 24,4% e de 22% (os pares de SG colocados em posições idênticas forneceram valores em geral muito próximos), valores absolutamente razoáveis para as condições dos testes, onde alguma variabilidade, ainda que pequena, na posição da carga sempre ocorre, além de diferenças de calibração entre os instrumentos de leitura de deformações. Tais valores, comparados ao valor de tensão numericamente calculada no topo da placa, conforme Tabela 5, conduz a relações  $\sigma_{\text{pista}}/\sigma_{\text{numérica}}$  equivalentes a 0,74 e a 0,79, ou seja, na ordem de 80%.
- Se os ESRD da prova de carga de outubro de 2000 (Tabela 2) estivessem carregados com 100 kN (hipótese plausível, uma vez que tal carga estaria entre 100 e 110 kN), a tensão proporcional no fundo da placa, seria de 0,177 MPa, sobre uma média de 0,21 de três valores individuais de tensão para ESRD encontrados na Tabela 2; isto implicaria em relação  $\sigma_{\text{pista}}/\sigma_{\text{numérica}}$  equivalente a 0,74 (considera-se improvável que os ESRD de caminhões carregados deixando a fábrica de cimentos estivessem com cargas inferiores a 100 kN sobre si).
- Há uma clara evidência de aderência no local da placa instrumentada entre a placa e a base em CCR (embora não se possa generalizar o fato para qualquer outra parte do pavimento, dadas as condições peculiares do acesso do estacionamento do centro administrativo, em operação mesmo antes da execução do concreto e após a execução do CCR, sem comentar o trecho em rampa e aspectos de lixiviação superficial da película de emulsão por ação de águas pluviais); caso não existisse aderência, as tensões de topo e fundo seriam, se calculadas numericamente, de cerca de 0,6 MPa, quatro vezes maiores portanto que as tensões aferidas, e assim, muito discrepante em relação aos resultados de todas as demais análises conduzidas neste trabalho. Barenberg e Zolliger (1990) chegaram a conclusões semelhantes sobre a questão da aderência entre base de CCR e placa de concreto por via absolutamente idêntica, embora alguns anos após realizados seus testes concluíram, em análises posteriores, que a aderência estaria deixando de existir.

**Tabela 5** Tensões simuladas numericamente para as condições da pista em Votorantim (Dez/2002)

Posição do ESRD	Tensão de Topo (MPa)	Tensão de Fundo (MPa)
Borda Longitudinal	- 1,22	0,62
Eixo a um metro da borda	- 0,50	0,24

Nota-se, que para ambos os casos, a relação  $\sigma_{\text{pista}}/\sigma_{\text{numérica}}$  oscila entre 0,75 e 0,8, aproximadamente. Quanto aos valores absolutos indicados, Yu et al. (1998) utilizando SG de superfície colocados em uma placa de CCP com 3,7 x 4,7 m, espessura de 292 mm, assente sobre uma base de concreto asfáltico, obtiveram resultados comparáveis àqueles presentemente relatados: o ESRD (com 80 kN) induziu, na borda longitudinal livre, uma tensão de compressão na flexão de -0,54 MPa, medida na direção de tráfego, supondo o mesmo módulo de elasticidade para o CCP (30 GPa). A diferença existente pode ser atribuída ao peso do referido eixo, que no Centro Administrativo da Fábrica Santa Helena, foi de 118,7 kN, pois suposta uma relação de linearidade entre tensão e carga, a



tensão resultante no experimento relatado pelos autores seria cerca de 0,8 MPa, bastante compatível com os valores presentemente observados.

Pereira (2001) também apontou para valores de tensões em placas de concreto ultradelgadas inferiores às expectativas geradas por emprego de modelagem numérica. Os resultados obtidos nos dois trabalhos convergem para conclusões semelhantes quanto às tensões de cálculo normalmente empregadas em projetos. E de que modo tais relações se apresentaram no caso da pista da USP para prova de carga realizada em novembro de 2001? A situação de análise seria um pouco diferente, pois, neste caso, tem-se provas de carga com diferentes registros de SG de imersão, todos operacionais, em posições bastante diferentes entre si. Os resultados de simulações de tensões numéricas para este último caso são apresentados na Tabela 6, na terceira coluna, sendo que em tal tabela são incluídos os valores das deformações reais extraídas da Tabela 3 e também das relações individuais  $\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$ .

Como mencionado, para fixar, nos cálculos das tensões é suposto que deformação medida é a deformação total na direção considerada (Lei de Hooke generalizada), ou seja, a deformação na direção mais a deformação devida ao coeficiente de Poisson na direção perpendicular (estado plano de tensões); tal condição será apresentada mais adiante. Verifica-se da Tabela 6 que, em todas as simulações numéricas, as tensões recebidas foram superiores àquelas aferidas a partir das deformações em pista, com relações  $\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$  variando entre 0,34 e 1,15. Desta forma, com base em todos os resultados encontrados, é possível afirmar que as deformações numericamente calculadas por elementos finitos resultam normalmente superiores àquelas tensões em pista, no pavimento de concreto.

**Tabela 6** Tensões de Tração na Flexão Numéricas para a pista USP (Nov/2000)

SG	Deformação média aferida ( $\mu\epsilon$ )	Deformações Numéricas ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$
E1x	13,02	27,477	0,47
E1bx	6,26	9,962	0,63
E1y	-3,32	-9,743	0,34
E1by	4,65	9,076	0,51
E2x	8,41	17,293	0,48
E3tx	18,30	15,969	1,15
E3x	4,18	8,155	0,51

Nas condições de campo, por outro lado, é razoável considerar que tanto a resistência do concreto quanto seu módulo de elasticidade variam mais que intervalos medidos em laboratório, sendo um bom parâmetro para aceitação em pista de um concreto limitar-se o coeficiente de variação da resistência, a partir de amostras coletadas e ensaiadas, em torno de 15%, em meio à perda de homogeneidade devido ao processo construtivo. Tomado tal limite de variação, o desvio padrão para o módulo de elasticidade do concreto seria de 3,86 MPa e o máximo valor estatístico homogêneo para o parâmetro seria de 29,6 GPa. Admitindo-se que, nos pontos de medidas de deformação em pista ocorresse tal incremento no parâmetro considerado, os valores para a relação  $\sigma_{\text{pista}}/\sigma_{\text{numérica}}$  atingiriam a nova faixa entre 0,46 a 1,05. Todavia é recomendável recordar que, em simulações numéricas, o valor médio estatístico do módulo de elasticidade deve ser mantido para a análise de respostas estruturais (não se projeta, ainda hoje, admitindo-se anisotropia no concreto).

Apesar disto, outros fatores contribuem para as discrepâncias verificadas, tais como a heterogeneidade no valor do coeficiente de Poisson bem como já se disse, a própria imprecisão dos

instrumentos de leitura de deformações e sua calibração, ainda que de maneira muito mais reduzida; o correto conhecimento do posicionamento de tais instrumentos é também fundamental (o que foi objeto de grande controle durante todos os experimentos apresentados). Independentemente de tais fatos, os dados indicados na Tabela 6 permitiram estabelecer a seguinte correlação (com  $R^2=0,69$ ):

$$\epsilon_{\text{pista}} = 0,50 \times \epsilon_{\text{numérica}} + 1,75 \quad [1]$$

Com base na expressão acima, para valores de deformação no concreto da ordem de 20  $\mu\epsilon$ , as deformações em pista resultariam em cerca de 60% das deformações específicas calculadas numericamente. Tomada a média e desvio padrão dos valores  $\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$  apresentados na Tabela 6, tem-se ainda um coeficiente de variação alto (44%) o que recomenda prudência no emprego direto da média como fator de conversão de cálculo para pista. Dentro dessas condições, como procedimento de segurança da representatividade dos valores estatístico, assumiria-se o valor da média acrescido do desvio padrão como representativo, o que resultaria em fator de conversão de 0,85, valor este coerente com as demais medidas comparativas obtidas para a pista experimental em Votorantim, de 0,80, conforme detalhado anteriormente.

Considerando-se simultaneamente, as expressões abaixo (Lei de Hooke generalizada e relação  $\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$ ):

$$\sigma_x^{\text{pista}} = \frac{E}{1 - \bar{\sigma}^2} \times (\bar{\alpha}_x^{\text{pista}} + \bar{\sigma} \times \bar{\alpha}_y^{\text{pista}}) \quad [2]$$

$$\bar{\alpha}^{\text{pista}} = 0,85 \times \bar{\alpha}^{\text{numérica}} \quad [3]$$

chega-se a:

$$\bar{\sigma}^{\text{pista}} = 0,85 \times \bar{\sigma}^{\text{numérica}} \quad [4]$$

Considerando então um concreto convencional para pavimentos em concreto simples, com  $f_{ct,f} = 5$  MPa, encontrando-se a faixa de variação de tensões de projeto entre 2,5 e 3,5 MPa, as tensões reais estariam na faixa entre 2,13 e 2,98 MPa, o que tornaria o projeto mais conservativo no caso de emprego das tensões numericamente definidas; isto de fato ocorre ao empregarmos pura e simplesmente os modelos de cálculo da PCA (1984), no que diz respeito a tensões motivadas por ações de eixos rodoviários, bem como quando emprega-se o modelo proposto por Balbo e Rodolfo (2003), similar ao modelo de cálculo de tensões da PCA, no que tange as solicitações do tráfego.

Sob tais aspectos, o emprego de fatores de segurança de cargas para sobrecarregar os eixos de projeto (por exemplo, majorando-se as cargas em 20%) tornam-se de difícil justificação quando se emprega como critério de projeto métodos baseados em análises por elementos finitos (como é o caso daqueles sugeridos por Rodolfo e Balbo, 2002; Balbo e Rodolfo, 2003; PCA, 1984; entre outros menos empregados). Pensando-se nos resultados apresentados, é possível recomendar, então, que a relação  $\epsilon_{\text{pista}}/\epsilon_{\text{numérica}}$  encontrada (já em si majorada em mais de 40% para levar em consideração as variabilidades em parâmetros de projeto como um todo, em especial, referentes ao módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do concreto, cargas e pressões em pneumáticos, em menor escala) seja empregada mesmo quando imposto um “fator de segurança de carga”, caso necessário e justificável.

## 5. CONCLUSÕES

Os trabalhos relatados, bem como sua análise e reflexões inerentes, representaram uma sistematização do desfecho de uma pesquisa em escala real, conduzida, dentre outros objetivos, a determinação dos efeitos de cargas e temperaturas em pavimentos de concreto, em clima tropical, com metas claramente estabelecidas desde seu início, de se alcançar uma tecnologia nacional para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto simples. Muito se avançou, porém, além de futuras avaliações de maior quantidade de resultados, com possíveis melhorias metodológicas nos sistemas eletrônicos de medição de deformações que possibilitariam ainda melhores ajustes nos modelos desenvolvidos, é mister o estudo do comportamento à fadiga de concretos convencionalmente empregados no Brasil, com materiais nacionais, bem como o estabelecimento de calibração entre tais modelos de fadiga e de modelos de desempenho quanto à fissuração do material em pista, o que representaria uma outra árdua tarefa. Além disso, a modelagem de desempenho dos pavimentos de concreto no Brasil, quanto a abertura de juntas, escalonamento de juntas, formação de fissuras, etc, continua em um atraso lamentável que necessita ser superado.

Uma das possibilidades que se abrem, após este trabalho, é a busca de critérios probabilísticos mais razoáveis para a definição de valores de projeto de módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, para concretos lançados, adensados e curados em condições de pista. Em regiões do país onde, por razões conhecidas, as cargas máximas legais são mormente respeitadas pelos operadores de caminhões, critérios probabilísticos relacionados aos carregamentos poderiam ser estudados por meio de dados obtidos de recentes séries históricas de pesagem. Quanto às conclusões mais importantes apresentadas, resultantes da coleta e análise dos dados na pesquisa realizada, destacam-se finalmente:

- Os modelos numéricos prevêem tensões de tração na flexão superiores àquelas aferidas fisicamente (em pistas experimentais), que podem chegar a 40% de majoração (para valores isolados), o que naturalmente induz ao dimensionamento conservativo dos pavimentos de concreto simples, apenas no que diz respeito a esforços induzidos pelo tráfego; todos os testes realizados indicaram por menores valores físicos que valores calculados por método numérico com exceção apenas do SG de topo E3tx na pista na USP. Tal discrepância poderia estar relacionada a uma alteração da posição no SG durante a concretagem, apesar de todos os cuidados tomados;
- Tensões medidas em pista com base de CCR (inicialmente em dúvidas se aderida) comparadas a valores numericamente obtidos para as mesmas tensões, e tendo-se como complementos fundamentais de análise os resultados obtidos para outra pista instrumentada, em termos relativos bem semelhantes, permitem afirmar que a pista experimental em Votorantim respondia às cargas, nas épocas de testes, como um pavimento aderido (placa de concreto vibrado sobre base em concreto compactado com rolo aderidas), ao menos no local instrumentado, dadas as evidências (inclusive visuais) de possível eliminação do elemento de quebra de aderência empregado no local;
- Aos modelos de cálculo de tensões em pavimentos de concreto simples propostos por Rodolfo e Balbo (2002) e Balbo e Rodolfo (2003) pode (e mesmo deve) ser aplicado um fator de ajuste de tensões equivalente a uma relação  $\sigma_{\text{pista}}/\sigma_{\text{numérica}} = 0,85$ , sem aparentes riscos de sub-dimensionamento, para se considerar as discrepâncias verificadas entre tensões de cálculo e tensões reais, em pistas instrumentadas em verdadeira grandeza. Tal fator de ajuste significaria levar à unidade um possível “fator de segurança de cargas” e mantidas as tensões de cálculo definidas pelo modelo numérico de projeto considerado (incluindo da PCA, 1984).

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão às seguintes instituições que fomentaram as pesquisas realizadas: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Pista USP e Pista Votorantim); Associação Brasileira de Cimento Portland (Pista Votorantim); S.A. Indústrias Votorantim (Pista Votorantim). O autor principal agradece aos espíritos obstinados, corajosos e dedicados, bem como aos bondosos e compreensivos corações dos demais co-autores, verdadeiros ícones para os trabalhos realizados, suas verdadeiras mãos e verdadeiros braços durante as múltiplas tarefas realizadas. Os demais autores agradecem também às duas bolsas de pesquisa de mestrado (FAPESP) e às duas bolsas de doutorado (FAPESP e CAPES) concedidas pelas respectivas agências de fomento. As conclusões apresentadas refletem a opinião dos autores e não da Universidade de São Paulo como um todo; supõe-se o uso dos modelos desenvolvidos por profissionais capazes de compreender o significado dos parâmetros considerados, bem como das possíveis limitações dos métodos empregados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003) Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. NBR 6118, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T.; Severi, A. A.; Rodolfo, M. P.; Pereira, D. da S. (2000) Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto: instrumentação da pista experimental na USP. In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2000. Editores: J. R. A. Setti & H. B. B. Cybis, ANPET, pp.533-538, Gramado.
- Balbo, J. T.; Rodolfo, M. P. (2003) Modelagem de tensões em pavimentos de concreto com base aderida e diferenciais térmicos. In: Anais da XVI ANPET, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 2, pp. 111-111, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T.; Pereira, D. da S.; Pitta, M. R.; Vizzoni, R.; Andras, A. C. (2003) Respostas Estruturais de Pavimentos de Concreto Simples Obtidas por Instrumentação em Acesso à Rodovia SP-79 na Fábrica Santa Helena – Votorantim. In: Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Cdrom, Vitória.
- Barenberg, E.; Zollinger, D. G. (1990) Validation of concrete pavements responses using instrumental pavements. Transportation Research Record 1286, Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board, pp. 67 – 77, Washington, D.C.
- Bathe, K.-J. (1982) Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Khazanovich L.; Ioannides A. M. (1993) Finite Element Analysis of Slabs-On-Grade Using Improved Subgrade Soil Models. In: Proceedings of the ASCE Specialty Conference Airport Pavement Innovations - Theory to Practice. Waterways Experiment Station, pp. 16-30, Vicksburg.
- Packard, R. G.; Tayabji, S. D. (1985) New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements. In: Proceedings of the 3th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, pp. 225 – 236, West Lafayette.
- Pereira, D. da S. (2001) Estudo de gradientes térmicos e deformações em whitetopping ultradelgado. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Mecânica de Pavimentos, 172 p., São Paulo.
- Rodolfo, M. P. (2001) Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Mecânica de Pavimentos, 293 p., São Paulo.
- Rodolfo M. P e Balbo J. T. (2002) Modelagem de Tensões em Pavimentos de Concreto Submetidos a Gradientes Térmicos e Cargas Rodoviárias. Transporte em Transformação Confederação Nacional dos Transportes e MAKRON Books, pp.101-177, São Paulo.
- Yu, H. T.; Khazanovich, L.; Darter, M. I.; Ardani, A. (1998) Analysis of Concrete Pavement Responses to Temperature and Wheel Loads Measured from Instrumented Slabs. Transportation Research Record 1227, Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board, pp. 94 – 101, Washington, D.C.

## Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PTR

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº 83 - Cidade Universitária – São Paulo - CEP 05508-900

Fone: (11) 3091-5306 Fax: (11) 3091-5716

<http://www.ptr.usp.br/lmp>

e-mail: [jotbalbo@usp.br](mailto:jotbalbo@usp.br)