

MODELAGEM NUMÉRICA DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COM O PROGRAMA COMPUTACIONAL ABAQUS

Jordana Vieira de Almeida
Francisco Thiago Sacramento Aragão
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Civil UFRJ/COPPE

RESUMO

Os pavimentos de concreto de cimento *Portland* apresentam comportamento estrutural complexo, portanto modelos empíricos tipicamente usados na literatura não conseguem estimar rigorosamente o seu comportamento. Assim, a combinação de programas experimentais e modelos numéricos bem definidos é uma opção mais apropriada que pode fornecer informações mais precisas sobre as respostas dos pavimentos às solicitações do tráfego. Neste estudo, dois modelos numéricos em 3D de pavimentos de concreto foram criados e usados para simular as deformações em uma placa instrumentada. Os resultados destas simulações foram comparados com os medidos em campo. Foram modeladas a pista experimental do IPR/DNER construída no Rio de Janeiro em 1997 e a placa 1 seção E do pavimento experimental da USP de São Paulo, de 1999. Adicionalmente, este artigo avaliou a influência da espessura e do módulo elástico do concreto e da sub-base granular e cimentada nas tensões e deformações que ocorrem na base da placa.

ABSTRACT

The Portland cement concrete pavement present complex structural behavior, so empirical models typically used in literature cannot rigorously estimate their behavior. Thus, combining experimental programs and well-defined numerical models is a more appropriated option that can provide more accurate information about pavement responses to traffic loads. In this study, two 3D numerical models of concrete pavements were designed and used to simulate the deformation of instrumented slabs. The results of these simulations were compared to those measured in the field. Two experimental segments were modeled: (a) IPR/DNER experimental segment built in Rio de Janeiro in 1997 and (b) slab 1, section E of the USP experimental segment built in São Paulo in 1999. Additionally, this paper also evaluated the effects of the thickness and the elastic modulus of the concrete and the granular- and cement-treated base on the stresses and strains that occur in the slab base.

1. INTRODUÇÃO

Para determinar as tensões e deformações que ocorrem na estrutura dos pavimentos de concreto podem ser utilizados modelos analíticos, como as equações propostas por Westergaard (1926), ábacos de influência como os de Pickett e Ray (1951) ou análises numéricas em programas computacionais. A análise numérica pelo método dos elementos finitos permite a obtenção de respostas mais adequadas, por possibilitar que fatores determinantes no desempenho do pavimento de concreto sejam considerados na análise, como por exemplo: placas de qualquer dimensão assentes sobre duas ou mais camadas, aderidas ou não e compostas por materiais de iguais ou diferentes propriedades; diferentes tipos de fundação; transferência de carga entre as juntas; qualquer condição de carregamento, como múltiplos eixos, pressões dos pneus variáveis e qualquer distância entre a carga aplicada e as juntas ou bordas da placa; etc.

No Brasil o método corrente de dimensionamento dos pavimentos de concreto é o da PCA (1984), que consta no Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005). Possui base teórica mecanicista, porém com certas limitações. Faz uso do método dos elementos finitos para analisar as tensões e deformações causadas pelo carregamento devido ao tráfego, em placas de concreto consideradas finitas, para tensões críticas no centro da placa com uma extremidade tangenciando a borda longitudinal e deflexões máximas no canto da placa. O método considera a ruptura do pavimento por fadiga e erosão.

Na literatura, diversos programas computacionais são usados, especialmente para calcular tensões e deformações em pavimentos de concreto em modelos 2D. Entre estes, destacam-se, o KENSLABS e o ILLI-SLAB. O primeiro faz parte do pacote computacional KENPAVE desenvolvido em Visual Basic e aprimorado em sua última versão por Huang (2004). O segundo foi desenvolvido em 1977 por Tabatabaie na universidade de Illinois, adaptado e melhorado por Kazanovich e Ioannides (1993) quando passou a se chamar ILSL2. Em sua última versão, virou ISLAB2000, atualizado por Khazanovich *et. al.*, em 2000. Ambos são programas fechados, nos quais o usuário apenas fornece os dados de entrada (carregamento, geometria da placa, tipo de base e fundação, propriedades dos materiais, entre outros) para obter os dados de saída (tensões, deformações, transferência de carga nas juntas, entre outros).

Rufino (1997) analisou tensões com os programas ILSL2 e KENSLABS variando a posição de carregamento na placa e observou que ambos resultaram em tensões próximas, sendo as do KENSLABS um pouco inferiores. Silva (2001) comparou valores medidos em campo com resultados calculados pelos programas ELSYM5, DIPLOMAT, ILSL2 e KENSLABS e concluiu que os dois últimos são mais apropriados para a verificação de pavimentos de concreto por possibilitarem considerar na análise condições mais realistas. Gondim (2008) estudou o KENSLABS 2004 e comparou o dimensionamento de um pavimento hipotético, utilizando o método da PCA (1984) e o KENSLABS, chegando à conclusão de que o programa possui grandes vantagens sobre o método, pois faz uma análise mais realista da sub-base e pode considerar o efeito dos gradientes térmicos.

O Abaqus é um programa computacional baseado no método dos elementos finitos, que realiza a análise de tensões e deformações em diversas estruturas. Trata-se de um software de propriedade da empresa Dassault Systèmes Simulia, lançado inicialmente em 1978. Permite modelar problemas complexos, sendo muito utilizado para análise de modelos tridimensionais. Por se tratar de um programa aberto para a análise de qualquer estrutura, todos os parâmetros para a modelagem de determinada estrutura precisam ser customizados. Para simular o comportamento do pavimento de concreto de maneira realista e eficiente é essencial que um modelo adequado seja desenvolvido. A verificação da eficiência do modelo pode ser comprovada comparando os resultados obtidos, com os de medições realizadas em campo.

Sadeghi e Hesami (2017) e Jouybari e Shafabakhsh (2017) desenvolveram modelos em três dimensões usando o Abaqus para prever o comportamento dos pavimentos de concreto submetidos ao efeito da carga de eixo móvel e analisar a eficiência da transferência de carga nas juntas. Ambos os modelos mostraram boa correlação com o campo, ao comparar os resultados obtidos para carregamento cíclico com a resposta medida por Sargand e Beegle (1998) para uma seção de pavimento instrumentada, localizada em Ohio, nos Estados Unidos.

Neste trabalho, foram feitas duas modelagens numéricas em 3D para verificar as tensões e deformações que ocorrem na estrutura dos pavimentos de concreto submetidos às cargas provenientes do tráfego. Foram escolhidas a pista experimental do IPR/DNER, construída em 1997 para a pesquisa em *whitetopping* realizada por Silva (2001), e a placa 1 seção E do pavimento experimental, feito em 1999, no campus da USP, em São Paulo, para estudo dos efeitos das variações térmicas nos pavimentos de concreto, apresentada por Balbo *et. al.* (2000). Ambas foram instrumentadas e tiveram as deformações causadas pelo contato pneu-pavimento na placa de concreto determinadas com o uso de *strain-gauges* (SG) e na pista do

IPR/DNER foram determinadas também as tensões com o uso de célula de carga.

Estas modelagens são parte do desenvolvimento de um modelo padrão para a previsão do comportamento estrutural de pavimentos de concreto com o Abaqus. Pretende-se que o modelo final realize uma análise eficiente de tensões e deformações, considerando, além das cargas provenientes do tráfego, o empenamento térmico da placa de concreto e a transferência de carga nas juntas pelas barras de transferência. Busca-se colaborar para melhor compreensão do comportamento dos pavimentos de concreto e no futuro com um novo método de dimensionamento.

2. MODELAGEM NUMÉRICA COM O ABAQUS

A modelagem foi realizada em 3D, com um conjunto de camadas representadas por sólidos contínuos, elásticos lineares, homogêneos, isotrópicos e de dimensões finitas. As condições de contorno adotadas foram selecionadas para se aproximar da condição real do pavimento de concreto. O modelo considerou a base do subleito engastada e as laterais da placa de concreto e das demais camadas impedidas de se moverem nas direções x e z e de rotacionar na direção y. Para ilustrar, a Figura 1 mostra o modelo da pista experimental do IPR/DNER, composto pelas camadas de material, com suas condições de contorno e área de carregamento.

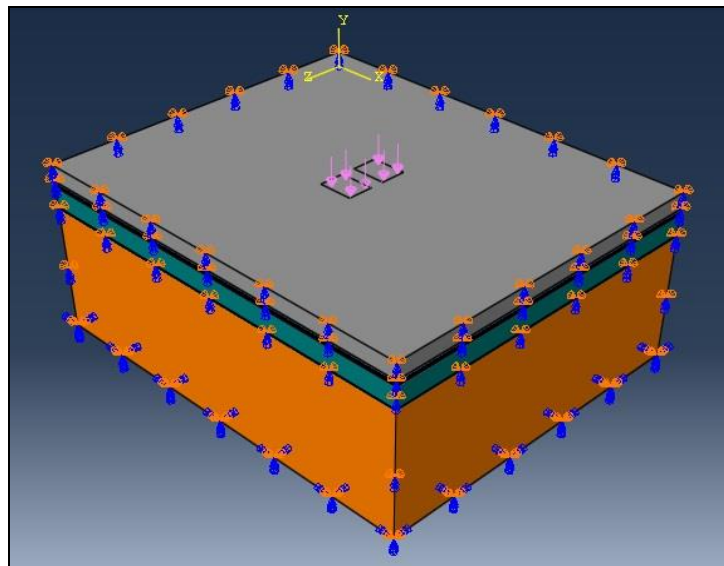


Figura 1: Modelo da pista do IPR/DNER composto pelas camadas de material, condições de contorno e carregamento.

Foi definido o uso de malha de hexaedros com oito nós e realizada uma análise de convergência para definir a dimensão apropriada dos elementos. Optou-se por usar uma malha mais refinada na região do carregamento e onde os SG e a célula de carga estão localizados por se tratarem dos pontos de maior interesse neste estudo, buscando assim otimizar o tempo de processamento, mantendo a confiabilidade das respostas. A Figura 2 mostra a malha utilizada no modelo do pavimento experimental da USP.

O primeiro modelo referente à pista do IPR/DNER é representado por placa de concreto *whitetopping* assente sobre camada asfáltica, sub-base de brita graduada e subleito de argila, com 3,6 m de comprimento e 3,0 m de largura. O segundo modelo referente à placa 1 da seção E do pavimento da USP, possui placa de concreto assente sobre sub-base de brita

graduada e subleito de argila, com 5,5 m de comprimento e 3,5 m de largura. A Figura 3 mostra as espessuras das camadas dos dois modelos.

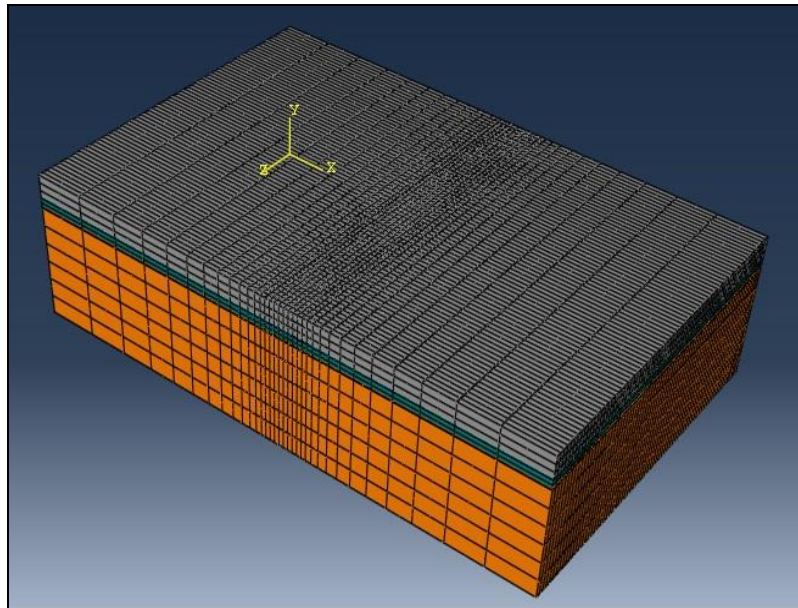


Figura 2: Malha de elementos finitos do modelo referente ao pavimento da USP.

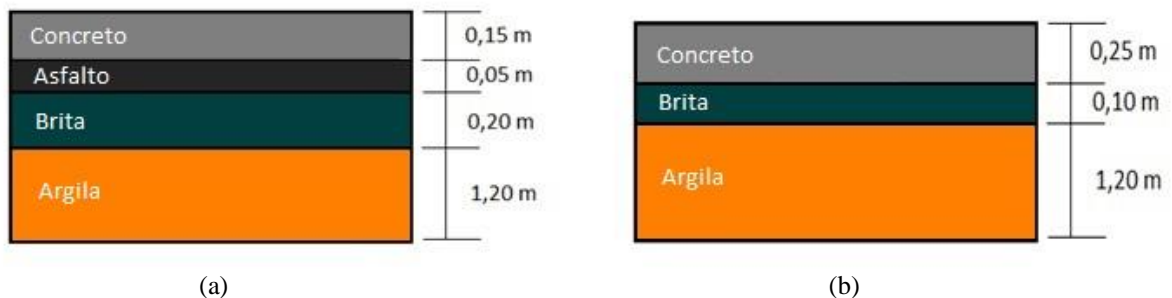


Figura 3: Espessura das camadas. (a) Pista do IPR/DNER. (b) Pavimento da USP.

Foram analisadas duas condições de aderência entre a placa e a camada sobre a qual ela está assente, aderida e não aderida, visto que é um fator muito importante para o desempenho do pavimento e que não há consenso quanto ao que de fato ocorre em campo.

2.1. Propriedades dos materiais

Na modelagem com o Abaqus, é necessário estabelecer as propriedades dos materiais de cada uma das camadas. No modelo do IPR/DNER foram adotadas propriedades determinadas por ensaios realizados por Silva (2001). Entretanto, no estudo referente ao modelo da USP, foram relatadas apenas informações de que a camada de sub-base era composta por brita graduada simples e o subleito por solo argiloso de aterro. Como neste estudo os modelos são compostos por camadas elásticas, foi necessário estimar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson para a camada de sub-base e para o subleito. Apesar de o mais correto ser a realização de ensaios para obter os valores reais, foram adotados valores recomendados pela IP-DE-P00/001 do DER de São Paulo. A Tabela 1 mostra as propriedades de cada camada de material que compõe os modelos.

Tabela 1: Propriedades dos materiais

Modelo 1 – IPR/DNER			Modelo 2 - USP		
Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Concreto	33.700	0,20	Concreto	26.000	0,20
Asfalto	2.730	0,25	Brita Graduada	300	0,35
Brita Graduada	90	0,35	Argila	150	0,45
Argila	193	0,45			

2.2. Carregamento

Para representar o carregamento devido ao contato pneu-pavimento, foi adotado um carregamento estático, mecânico do tipo pressão. No modelo do IPR/DNER, simulou-se o carregamento de um conjunto de rodas duplas com carga de 57,5 kN e pressão de contato de 435,6 kPa, aplicado no centro da placa de concreto. Silva (2001) verificou a área real de contato pneu-pavimento imprimindo os pneus em uma cartolina e chegou às dimensões mostradas na Figura 4 (a), que foram as adotadas nesta modelagem. No modelo da USP foi representado o eixo traseiro de um caminhão caçamba, com rodas duplas, pesando 83,6 kN e com pressão de contato de 638 kPa. Como não foram estabelecidas as medidas de contato pneu-pavimento e nem do eixo do veículo, foram adotadas as dimensões conforme a Figura 4 (b), que se enquadram nas especificações do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006).

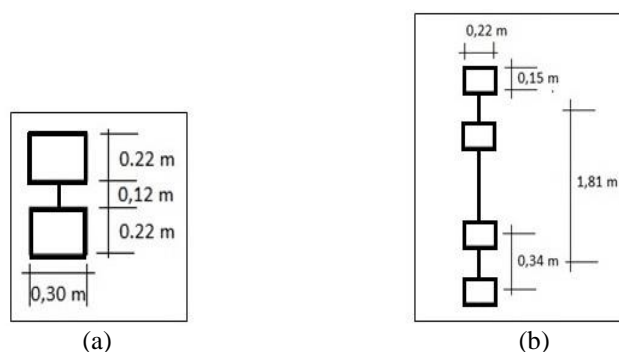


Figura 4: Dimensões dos carregamentos usados nas modelagens desta pesquisa. (a) Pista do IPR/DNER. (b) Pavimento da USP.

3. RESULTADOS DA MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO MODELO

3.1. Pista experimental do IPR/DNER

Na pista experimental do IPR/DNER foram determinadas as tensões e deformações no centro da placa de concreto, em sua base (no contato com a camada asfáltica), para comparar os resultados obtidos com os medidos em campo. A Figura 5 mostra o resultado das tensões em z para placa e sub-base aderidas e a Figura 6 mostra as tensões em z na base da placa de concreto. A cor azul representa tensões de compressão e a vermelha tensões de tração. Silva (2001) obteve em campo, com o uso de *strain-gauges* e célula de carga, posicionados conforme a Tabela 2, os resultados de ϵ_x , ϵ_z e σ_y e calculou com equações os valores de σ_x e σ_z . A Tabela 3 mostra estes resultados e os obtidos na modelagem no Abaqus para placa e sub-base aderida e não aderida, além da relação de porcentagem entre campo e modelo.

Ao comparar os resultados obtidos no modelo proposto com os de campo é possível verificar que eles são bem próximos. Na condição placa e sub-base não aderidas, os valores ficaram um

pouco maiores que os de campo, exceto para σ_y , que ficou menor. Já na condição aderida, os valores de ϵ_x , σ_x e σ_y foram um pouco inferiores, enquanto ϵ_z e σ_z um pouco superiores. Quando as camadas estão aderidas, há uma redução nas tensões e deformações devido ao deslocamento da linha neutra na placa para uma posição mais próxima ao fundo. Como o pavimento é composto por materiais heterogêneos, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson das camadas podem sofrer variações, portanto é normal que os resultados não sejam exatos. É importante ressaltar também que Silva (2001) extraiu seis corpos de prova da pista e verificou que três deles apresentavam concreto aderido ao asfalto e três não apresentavam aderência, mostrando que parte da pista se encontrava aderida e parte não estava aderida.

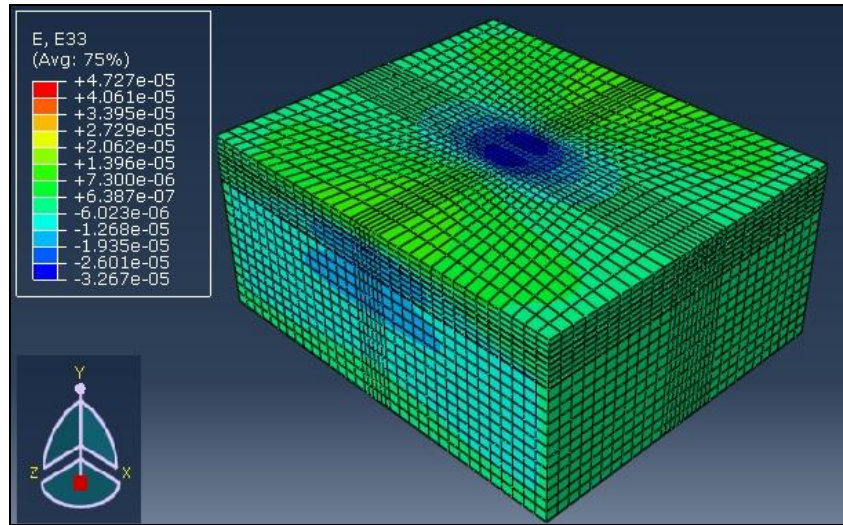


Figura 5: Ilustração dos resultados gráficos de tensões em z para o modelo do IPR/DNER.

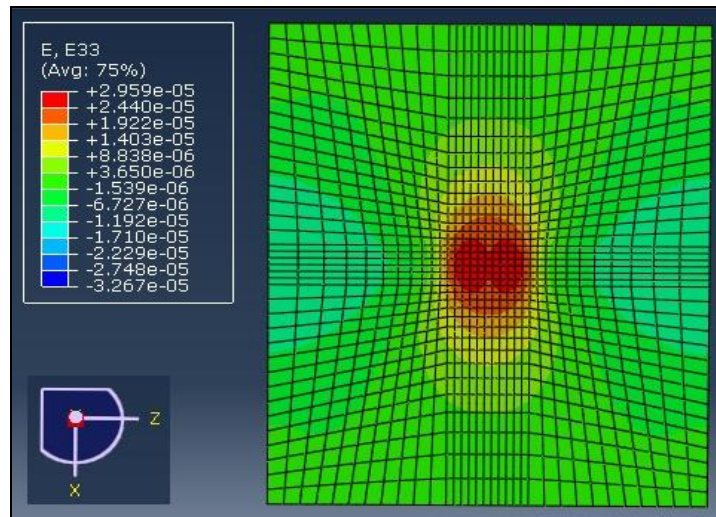


Figura 6: Ilustração dos resultados gráficos de tensões em z na base da placa de concreto.

Tabela 2: Posição dos *strain-gauges* e da célula de carga na placa de concreto (Silva, 2001).

SG e Célula de Carga	Posição (x,y) a partir do centro da placa (mm)	Distância até e o fundo da placa (mm)
SG Ex	0, 0	20
SG Ez	0, 0	20
Cel σ_y	0, 0	0

Tabela 3: Resultados de tensões e deformações na pista do IPR/DNER e relação entre os resultados do campo e do modelo.

	Resultados de Campo (Silva, 2001)	Resultados do Modelo Abaqus		Relação Campo/Modelo (%)	
		Camada não aderida	Camada aderida	Camada não aderida	Camada aderida
ϵ_x (m/m)	$37,80 \times 10^{-6}$	$39,36 \times 10^{-6}$	$33,53 \times 10^{-6}$	0,96	1,13
ϵ_z (m/m)	$18,04 \times 10^{-6}$	$24,68 \times 10^{-6}$	$20,90 \times 10^{-6}$	0,73	0,86
ϵ_y (m/m)	-	$-16,88 \times 10^{-6}$	$-14,60 \times 10^{-6}$	-	-
σ_x (MPa)	1,45	1,54	1,31	0,94	1,11
σ_z (MPa)	0,90	1,13	0,96	0,79	0,94
σ_y (MPa)	-0,041	-0,033	-0,037	1,24	1,11

3.2. Pavimento experimental da USP

Na placa 1 seção E do pavimento experimental da USP foram determinadas as deformações em 4 pontos, denominadas E1x, E1z, E1bx e E1bz e posicionados conforme a Tabela 4 extraída de Balbo *et. al.* (2004). Na modelagem, foram realizados testes colocando a carga estática a 0,68 m da borda da placa, simulando o carregamento de um caminhão, conforme ocorreu em campo. A Tabela 4 mostra as posições nas quais os *strain-gauges* foram instalados para medir deformações nas direções x e z. Na Tabela 5, é possível verificar os resultados obtidos no modelo para placa e sub-base, aderidas e não aderidas, os medidos em campo e a relação entre os resultados do campo e do modelo.

Tabela 4: Posição dos *strain-gauges* na placa de concreto (Balbo *et al.*, 2004).

SG	Posição (x,y) do SG a partir do centro da placa (mm)	Distância entre SG e o fundo da placa (mm)
E1x	0, 186	20
E1z	213, 0	20
E1bx	360, 1460	20
E1bz	579, 1000	20

Tabela 5: Resultados de tensões e deformações no pavimento da USP e relação entre os resultados do campo e do modelo.

Deformação (m/m)	Resultados de Campo (Balbo <i>et. al.</i> , 2004)	Resultados do Modelo		Relação Campo/Modelo	
		Camada não aderida	Camada aderida	Camada não aderida	Camada aderida
E1x	$13,02 \times 10^{-6}$	$9,08 \times 10^{-6}$	$8,19 \times 10^{-6}$	1,43	1,58
E1z	$-3,32 \times 10^{-6}$	$-4,82 \times 10^{-6}$	$-4,51 \times 10^{-6}$	0,69	0,73
E1bx	$6,26 \times 10^{-6}$	$9,27 \times 10^{-6}$	$8,44 \times 10^{-6}$	0,67	0,74
E1bz	$4,65 \times 10^{-6}$	$7,71 \times 10^{-6}$	$7,42 \times 10^{-6}$	0,60	0,62

Com os resultados, foi verificado que nas duas condições de aderência entre placa e sub-base a deformação obtida no modelo proposto foi maior que a de campo em E1z, E1bx e E1bz. Apenas em E1x o resultado do modelo foi menor, provavelmente devido ao comprimento do eixo, que pode ter sido menor que o usado em campo, o que fez com que o carregamento da roda ficasse mais longe do ponto onde o sensor foi instalado. Apesar de os resultados não estarem tão próximos como na modelagem da pista do IPR/DNER, eles também apresentam coerência, visto que para a realização desta modelagem não havia todas as informações necessárias, além de existir a heterogeneidade dos materiais, que não foi considerada, e os diversos fatores que afetam a precisão dos instrumentos de leitura instalados em campo.

3.3. Comparação com modelagem numérica realizada no ILSL2

Silva (2001) e Balbo *et. al.* (2004), em seus estudos sobre a pista experimental do IPR/DNER

e o pavimento experimental da USP, respectivamente, além de realizarem a instrumentação das placas de concreto, também fizeram uma análise numérica com o programa computacional ILSL2 para verificar as tensões e deformações com este programa de elementos finitos bidimensional. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos em campo na pista experimental do IPR/DNER, na modelagem com o ILSL2 para a placa de concreto e sua camada de suporte considerada aderida e não aderida e na modelagem com o Abaqus. A Tabela 7 faz a comparação com os dados referentes ao pavimento da USP.

Os resultados obtidos na modelagem com o Abaqus ficaram mais próximos dos resultados de campo do que os resultados obtidos com o ILSL2, para ambos os casos de aderência. Com isso, é possível constatar a eficiência dos parâmetros de modelagem adotados para criar o modelo no Abaqus feito nesta pesquisa.

Tabela 6: Resultados da pista IPR/DNER, com modelagem no ILSL2 e Abaqus.

	Resultados de Campo (Silva, 2001)	Modelagem com ILSL2 (Silva, 2001)		Modelagem com Abaqus (este estudo)	
		Camada não aderida	Camada aderida	Camada não aderida	Camada aderida
ϵ_x (m/m)	$37,80 \times 10^{-6}$	$55,5 \times 10^{-6}$	$48,0 \times 10^{-6}$	$39,29 \times 10^{-6}$	$33,48 \times 10^{-6}$
ϵ_z (m/m)	$18,04 \times 10^{-6}$	$38,8 \times 10^{-6}$	$37,8 \times 10^{-6}$	$24,73 \times 10^{-6}$	$20,95 \times 10^{-6}$
σ_x (MPa)	1,45	2,22	1,92	1,54	1,31
σ_z (MPa)	0,90	1,75	1,52	1,14	0,96

Tabela 7: Resultados do pavimento da USP, com modelagem no ILSL2 e Abaqus.

Deformação (m/m)	Resultados de Campo (Balbo <i>et. al.</i> , 2004)	Modelagem com ILSL2 (Balbo <i>et. al.</i> , 2004)	Modelagem com Abaqus (este estudo)	
			Camada não aderida	Camada aderida
E1x	$13,02 \times 10^{-6}$	$27,48 \times 10^{-6}$	$9,08 \times 10^{-6}$	$8,19 \times 10^{-6}$
E1z	$-3,32 \times 10^{-6}$	$-9,74 \times 10^{-6}$	$-4,82 \times 10^{-6}$	$-4,51 \times 10^{-6}$
E1bx	$6,26 \times 10^{-6}$	$9,96 \times 10^{-6}$	$9,27 \times 10^{-6}$	$8,44 \times 10^{-6}$
E1bz	$4,65 \times 10^{-6}$	$9,08 \times 10^{-6}$	$7,71 \times 10^{-6}$	$7,42 \times 10^{-6}$

4. FATORES QUE INFLUENCIAM AS TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Buscou-se também neste trabalho, com a modelagem numérica, verificar a influência do módulo elástico e da espessura da placa e da sub-base nas tensões e deformações que ocorrem na base da placa de concreto. Para sub-base cimentada, foram analisadas as condições de placa e sub-base aderida e não aderida. Com os mesmos parâmetros de modelagem usados anteriormente e as propriedades dos materiais conforme a Tabela 8, foi modelada uma placa de concreto assente sobre sub-base e subleito, com 4,0 m de comprimento e 3,0 m de largura, carregada por um eixo simples roda dupla localizado no centro da placa, aplicando um carregamento de 80 kN e pressão de contato de 550 kPa. O modelo padrão tem as espessuras iguais às da Figura 3 (b) e a partir dele foram analisadas variações conforme a Tabela 9. A Figura 7 mostra os resultados da análise das espessuras e a Figura 8 dos valores de módulo.

Tabela 8: Propriedades dos materiais.

Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Concreto	26.000	0,20
Material Cimentado	15.000	0,25
Material Granular	300	0,35
Argila	150	0,45

Tabela 9: Fatores que variaram na análise paramétrica do modelo proposto nesta pesquisa.

Parâmetro	Variações			
Espessura da Placa - Não Aderida	0,15 m	0,20 m	0,25 m	0,30 m
Espessura da Sub-base Granular – Não Aderida	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m
Espessura da Sub-base Cimentada - Não Aderida	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m
Espessura da Sub-base Cimentada - Aderida	0,10 m	0,15 m	0,20 m	0,25 m
Módulo do Concreto - Não Aderida	20 GPa	26 GPa	30 GPa	35 GPa
Módulo da Sub-base Granular - Não Aderida	150 MPa	200 MPa	250 MPa	300 MPa
Módulo da Sub-base Cimentada - Não Aderida	5 GPa	10 GPa	15 GPa	20 GPa
Módulo da Sub-base Cimentada - Aderida	5 GPa	10 GPa	15 GPa	20 GPa

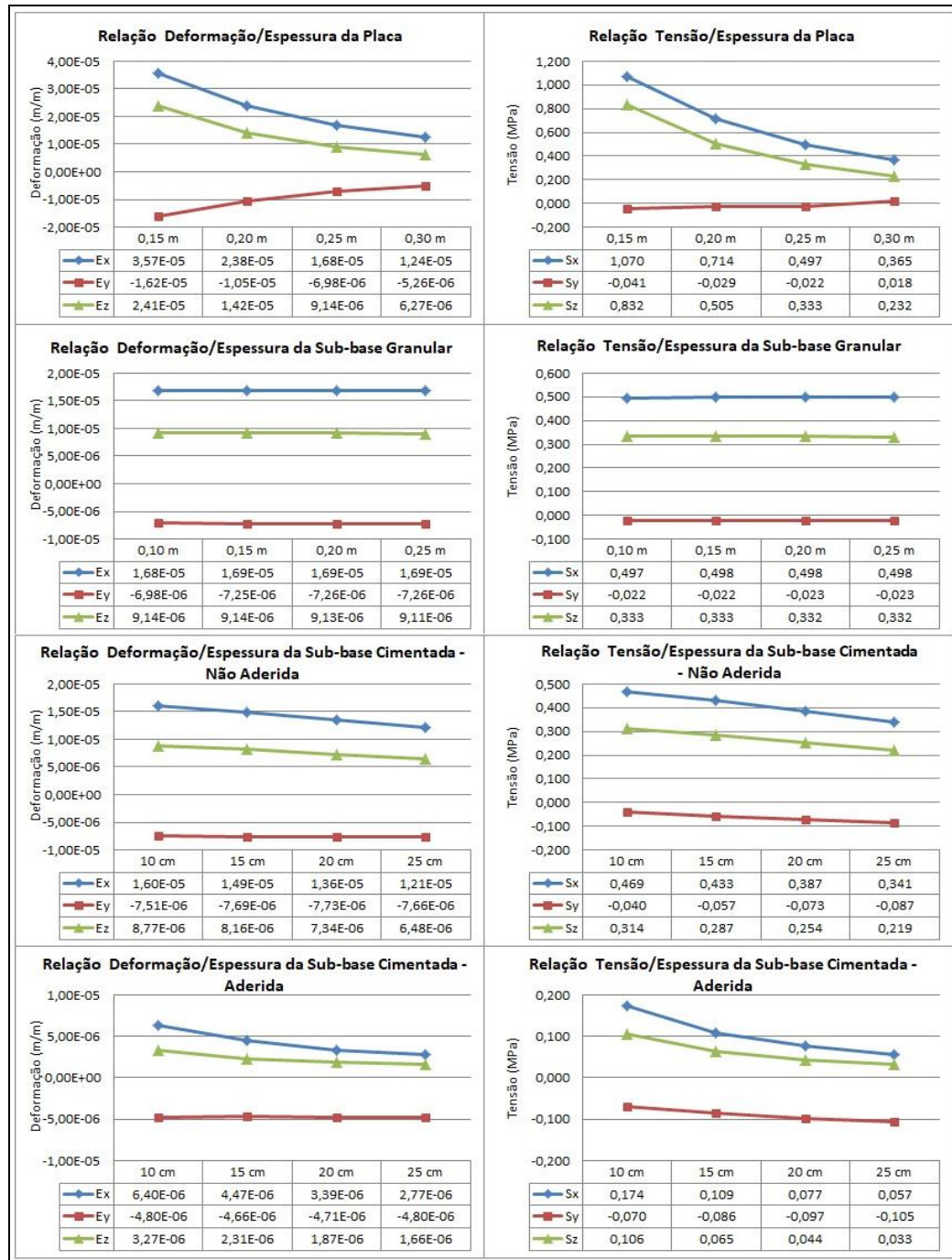


Figura 7: Resultados da análise de variação da espessura da placa e da sub-base granular e cimentada.

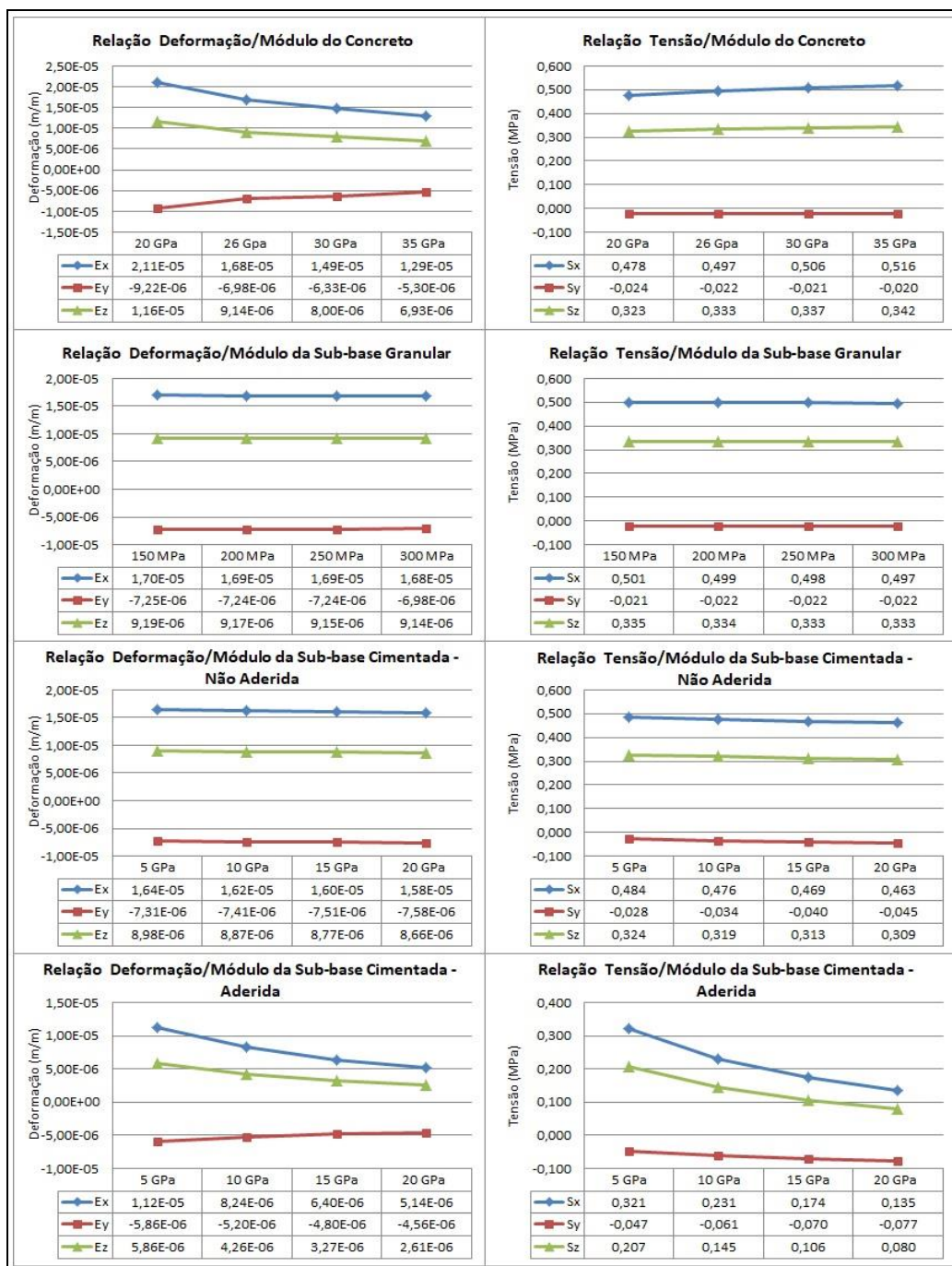


Figura 8: Resultados da análise de variação do módulo do concreto e do material que compõe a sub-base, granular e cimentado.

Com os resultados obtidos ao variar as espessuras, é possível verificar que entre os fatores analisados, o que mais influenciou as tensões e as deformações na base da placa de concreto, devido à carga proveniente do tráfego, foi a espessura da própria placa, modelada assente sobre sub-base granular. Quanto maior a espessura da placa, menores são as tensões e deformações. Entretanto, este decréscimo ocorre em proporções distintas. A variação da espessura da sub-base granular não afetou os resultados de tensões e deformações na base da placa de concreto. Entretanto, modelando a placa sobre sub-base cimentada e variando a espessura da sub-base, verificou-se que houve uma pequena redução nas tensões e

deformações para a condição não aderida e grande redução na condição aderida. Para as camadas aderidas, as tensões e deformações foram reduzidas em mais que a metade na maioria dos casos analisados. A exceção foram as tensões verticais que, ao invés de diminuir, aumentaram.

O módulo de elasticidade do concreto também apresentou influência significativa no comportamento das tensões e deformações, mas não tanto quanto a espessura da placa. A variação do módulo da sub-base granular praticamente não apresentou interferência. Ao analisar a sub-base cimentada, considerada não aderida, comparando valores de módulo que condizem com os de solo cimento, brita graduada tratada com cimento (BGTC) e concreto compactado a rolo (CCR), verificou-se que as tensões e deformações diminuíram pouco. No entanto, ao considerar essas variações para a condição aderida, as tensões e deformações foram reduzidas significativamente, em mais da metade na maioria dos casos analisados, exceto para as tensões verticais, que aumentaram.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi apresentada uma modelagem numérica customizada de pavimentos de concreto com o programa computacional Abaqus. Os resultados obtidos mostram que o modelo desenvolvido consegue obter respostas adequadas para as tensões e deformações causadas pelo tráfego, quando comparado aos resultados obtidos em campo e com os resultados do programa ILSL2. O Abaqus se mostrou bastante eficiente e o modelo desenvolvido ainda pode ser complementado e passar a considerar outros fatores importantes para prever o comportamento dos pavimentos de concreto, como as juntas com barras de transferência, o empenamento térmico e o carregamento dinâmico, próximos passos desta pesquisa.

Na análise da condição de aderência entre a placa e a sua camada de suporte verificou-se que quando as camadas estão aderidas há uma redução nas tensões em x e z e nas deformações, devido do deslocamento da linha neutra na placa para uma posição mais próxima do fundo. Este fenômeno se bem analisado no dimensionamento junto com as características da sub-base a ser adotada, pode gerar redução no dimensionamento da espessura da placa.

Ao analisar a relevância de alguns fatores que podem influenciar as tensões e deformações que ocorrem na base da placa de concreto, a espessura da placa se mostrou determinante. A rigidez do concreto também apresentou influência significativa. A espessura e o módulo da sub-base granular não interferiram nos resultados. Quando não há aderência entre a placa e a sub-base cimentada ocorre pouca redução nas tensões e deformações ao variar a espessura e o módulo da sub-base, mas quando há aderência a redução é muito expressiva, chegando a reduzir os valores em mais da metade em alguns dos casos analisados.

Como o dimensionamento de pavimentos de concreto no Brasil ainda é realizado de maneira simplificada, com o uso de tabelas de tensões, e não leva em consideração alguns fatores importantes para o bom desempenho do pavimento, buscou-se com esta pesquisa mostrar uma alternativa eficiente para a análise de tensões e deformações, que pode ser aprimorada e modificada conforme as condições de cada projeto. Será dada continuidade ao desenvolvimento do modelo e pretende-se que ele considere também o empenamento térmico da placa e a transferência de carga nas juntas pelas barras de transferência, para melhor compreensão do comportamento dos pavimentos de concreto.

Agradecimentos

À professora Laura Maria Goretti da Motta pela orientação no decorrer da pesquisa, por todo o conhecimento transmitido e pela imensa generosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus (2014) *Guide Version 6.14 - Computer Software for Interactive Finite Element Analysis*. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. Pawtucket, Rhode Island, USA
- Baldo, J. T.; A. A. Severi; M. P. Rodolfo e D. S. Pereira (2000) Pesquisa dos Efeitos do Clima sobre Pavimentos de Concreto – Instrumentação da Pista Experimental na USP. *Anais do XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Gramado, v. 1, p. 533-538.
- Baldo, J. T.; M. P. Rodolfo; D.S. Pereira e A.A. Severi (2004) Calibração de Tensões em Pavimentos de Concreto Simples com Base em Medidas Físicas em Pistas Experimentais. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportese*, ANPET, Florianópolis, v. 1, p. 307-318.
- DER (2006) *IP-DE-P00/001 Projeto de Pavimentação*, Departamento de Estradas e Rodagens, São Paulo.
- DNIT (2005a) *IPR – 714 Manual de Pavimentos Rígidos*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2006b) *IPR – 723 Manual de Estudos de Tráfego*. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Gondim, Y. C. (2008) *Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Utilizando o Programa Computacional Kenslabs 2004 e comparação com o método da PCA 1984*. Dissertação de mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Huang, Y. H. (2004) *Pavements Analysis and Design* (2ªed.). Prentice - Hall, New Jersey, USA.
- Jouybari, S. T. e G. A. Shafabakhsh (2017) Finite Element Investigation of Load Transfer Efficiency in Jointed Plain Concrete Pavements. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, Irã.
- Khazanovich L. e A. M. Ioannides (1993) Finite Element Analysis of Slabs-On-Grade Using Improved Subgrade Soil Models. *Proceedings of the ASCE Specialty Conference Airport Pavement Innovations - Theory to Practice*. Waterways Experiment Station, Vicksburg, v. 1, p. 16-30.
- Khazanovich L.; H. T. Yu; S. Rao; K. Galasova; E. Shats e R. Jones (2000) *ISLAB2000, Finite Element Analysis Program for Rigid and Composite Pavements, User's Guide*, ERES Consultants, Champaign, Illinois, USA.
- PCA (1984) *Thickness design for concrete highway and street pavements*. Portland Cement Association, Skokie, USA.
- Pickett, G. e G. K. Ray (1951) Influence Charts for Concrete Pavement. *Transactions, ASCE*, v. 116.
- Rufino, D. M. S. (1997) *Estudo dos procedimentos de dimensionamento e dos novos programas de análise de tensões em Pavimentos de Concreto*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Sadeghi, V. e S. Hesami (2017) Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements (JPCP) using FEM. *International Journal of Pavement Research and Technology*, China.
- Sargand, S. M. e D. I. Beegle (1998) Three-dimensional finite element software development and verification case study. *First National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis and Design*, Charleston, USA.
- Silva, P. D. E. A. (2001) *Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (Whitetopping) na Pista Circular Experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Westergaard, H. M. (1926) Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variations of Temperature. *Proceedings Highway Research Board*, v. 6.