

## 7. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO

---

Neste item é realizada a comparação entre os três modelos de cálculo estudados, Modelo de Viga Equivalente (WVU), Modelo de Placa Ortotrópica Equivalente (OTB) e Modelo em Elementos Finitos (ANSYS).

Para tanto, os dois tabuleiros estudados em escala 1:3 foram submetidos ao carregamento estático da Classe 45 conforme especificações da Norma Brasileira de Ações em Pontes (NBR 7188, 1984).

As superestruturas em questão possuem as seguintes características geométricas e físicas:

Tabuleiro 1  $\Rightarrow L = 375,00$  cm

$b = 285,00$  cm

$h = 19,40$  cm

Número de vigas = 16

Distância livre entre vigas = 15,00 cm

Largura das vigas = 3,75 cm

Espessura da mesa = 4,90 cm

$E_w = 9504$  MPa (Módulo de elasticidade à flexão das nervuras)

$E_{f,x} = 8945$  MPa (Módulo de elasticidade à flexão longitudinal da mesa)

$E_{f,y} = 95$  MPa (Módulo de elasticidade à flexão transversal da mesa)

$G_{f,xy} = 307$  MPa (Módulo de elasticidade à torção da mesa)

Tabuleiro 2  $\Rightarrow L = 375,00$  cm

$b = 284,00$  cm

$h = 19,40$  cm

Número de vigas = 12

Distância livre entre vigas = 21,73 cm

Largura das vigas = 3,75 cm

Espessura da mesa = 4,90 cm

$E_w = 9504 \text{ MPa}$  (Módulo de elasticidade à flexão das nervuras)

$E_{f,x} = 8348 \text{ MPa}$  (Módulo de elasticidade à flexão longitudinal da mesa)

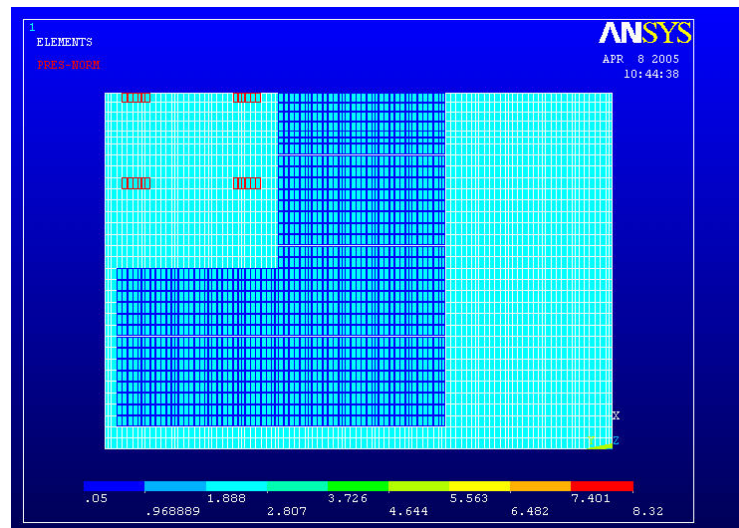
$E_{f,y} = 90 \text{ MPa}$  (Módulo de elasticidade à flexão transversal da mesa)

$G_{f,xy} = 290 \text{ MPa}$  (Módulo de elasticidade à torção da mesa)

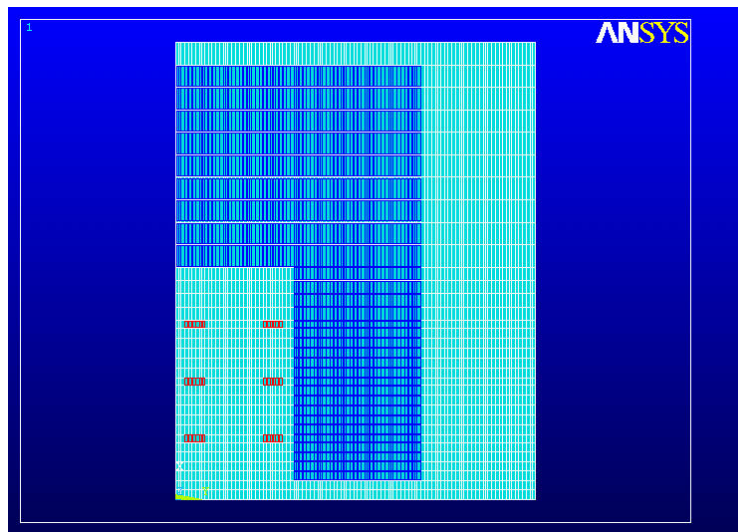
O veículo-tipo da Classe 45 é composto por seis rodas, cada uma com 75 kN, perfazendo um total 450 kN. Em torno do veículo, é aplicada uma carga distribuída de  $5 \text{ kN/m}^2$ .

O posicionamento crítico do veículo tipo e da carga distribuída, em relação à seção transversal da ponte, foi determinado a partir da análise do efeito de força unitária com posição variável em relação à seção transversal. No caso do momento fletor e da flecha, a força unitária foi aplicada na seção situada no meio do vão. No caso da força cortante, a força unitária foi aplicada em uma seção distante dos apoios uma distância equivalente a duas vezes a altura da nervura.

Para as avaliações de flecha e tensão normal máxima, o veículo tipo foi posicionado na borda esquerda dos tabuleiros, e centralizado em relação ao comprimento. Para a avaliação de tensão cisalhante, o veículo tipo foi posicionado na borda esquerda, com o eixo de extremidade a uma distância de  $2h$  do apoio. As figuras 217 e 218 ilustram o posicionamento do veículo-tipo sobre o tabuleiro.



**Figura 217** – Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão normal e flecha (meio tabuleiro com simetria longitudinal)



**Figura 218** – Posicionamento do veículo tipo para a análise da tensão cisalhante (tabuleiro inteiro)

Para a análise de tensão normal e flecha, foi utilizado o mesmo Modelo em Elementos Finitos utilizado anteriormente, com simetria longitudinal. Para a análise da tensão de cisalhamento foi necessária a utilização de outro Modelo em Elementos Finitos com menor nível de discretização, pois a condição de simetria não pode ser usada.

Para o cálculo com o Modelo de Placa Ortotrópica Equivalente, foi utilizado o programa OTB descrito no Capítulo 3 deste trabalho. Para o cálculo da rigidez à flexão longitudinal da placa equivalente foi utilizada a largura da mesa colaborante determinada pela equação 88.

No Modelo de Viga Equivalente a largura da mesa colaborante foi determinada também pela equação 88 e o Fator de Distribuição de Carga, pela equação 89.

$$b_m = \frac{\frac{S}{2}}{1 + \left( 2 \sqrt{\frac{E_x}{G_{xy}}} \frac{S}{2L} \right)^2} \quad (88)$$

Onde:

$b_m$  = largura da aba;

$S$  = distância livre entre as nervuras,

$L$  = vão da ponte;

$E_x$  = módulo de elasticidade à flexão longitudinal da mesa

$G_{xy}$  = módulo de elasticidade à torção da mesa

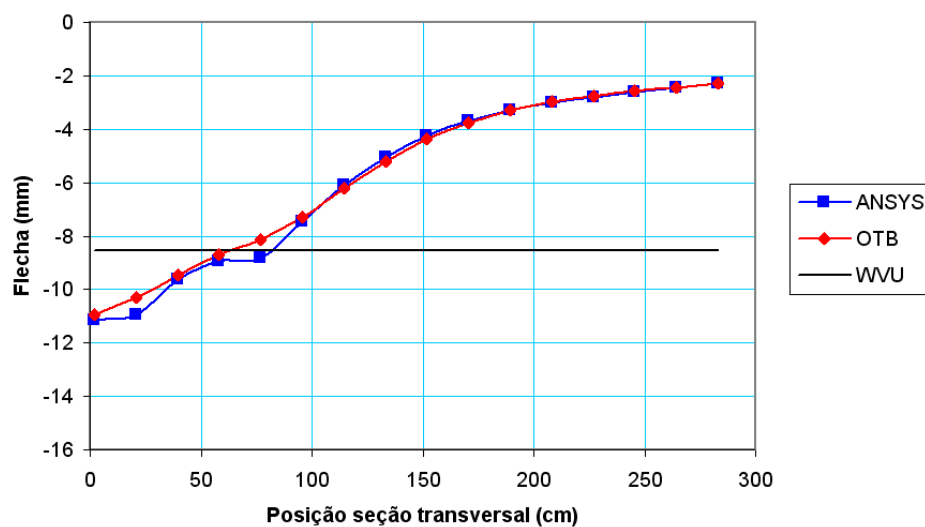
$$W_L = \frac{3N_L}{2,64N_b - 0,64} \quad (89)$$

Onde:

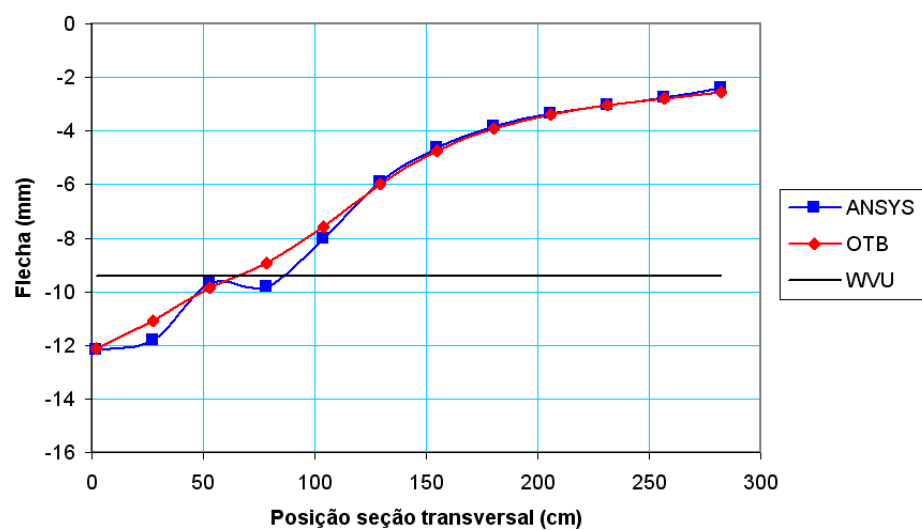
$N_L$  = número de faixas de tráfego,

$N_b$  = número de vigas ao longo da seção transversal.

Os gráficos das figuras 219 e 220 mostram os deslocamentos verticais da seção transversal no centro do vão obtidos pelos três métodos avaliados.



**Figura 219** – Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 1



**Figura 220** – Deslocamento vertical da seção transversal – tabuleiro 2

Nota-se uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo ANSYS e pelo OTB,

comprovando a eficiência do Método de Placa Ortotrópica Equivalente. Entretanto, o valor de flecha máxima obtido pelo Método WVU diverge consideravelmente dos outros.

A tabela 40 mostra os valor do deslocamento vertical máximo obtido pelos três métodos.

**Tabela 40:** Valores máximos de flecha

Método	Deslocamento vertical máximo (mm)	
	Tabuleiro 1	Tabuleiro 2
ANSYS	11,16	12,15
OTB	10,95	12,11
WVU	8,55	9,40

A principal diferença entre o Método de Placa Ortotrópica Equivalente e o Método de Viga Equivalente é que, no primeiro, os esforços são obtidos pela solução da equação de placas ortotrópicas (Equação de Huber) e, no segundo, os esforços são obtidos pela solução de uma viga isolada sujeita a uma porcentagem do carregamento de uma faixa de tráfego, porcentagem esta definida pelo Fator de Distribuição de Carga.

Para os tabuleiros em questão, o valor do Fator de Distribuição de Carga obtido da equação 89 é 14,4% para o tabuleiro 1 e 19,3% para o tabuleiro 2.

Dos ensaios experimentais realizados (item 6.2.5), foram obtidos os seguintes Fatores de Distribuição de Carga: 18% para o tabuleiro 1 e 23% para o tabuleiro 2. Deve ser salientado que, no ensaio experimental, foram feitas algumas simplificações no carregamento, sendo este composto de quatro cargas concentradas, simulando os eixos do veículo-tipo, sem a aplicação de carga distribuída em torno do veículo.

Na comparação entre os métodos de cálculo os tabuleiros foram calculados com o carregamento da Norma NBR7188 (Classe 45). Por esse motivo, o Fator de Distribuição de Carga pode diferir do valor obtido dos ensaios.

Foi determinado o Fator de Distribuição de Carga teórico, utilizando o ANSYS, em função da flecha para a nervura mais crítica. Os valores encontrados foram: 18,8% para o tabuleiro 1 e 25% para o tabuleiro 2.

A tabela 41 mostra os valores de tensão normal e cisalhante máximas obtidas pelos três métodos.

**Tabela 41:** Valores máximos de tensão normal e cisalhante

<b>Método</b>	<b>Tensão Normal (MPa)</b>		<b>Tensão Cisalhante (MPa)</b>	
	<b>Tabuleiro 1</b>	<b>Tabuleiro 2</b>	<b>Tabuleiro 1</b>	<b>Tabuleiro 2</b>
ANSYS	7,82	8,33	1,41	1,78
OTB	7,54	8,34	1,58	1,89
WVU	7,76	8,45	1,39	1,98

Observando a tabela 41 pode-se notar a boa concordância entre os valores das tensões normais obtidos pelos diferentes métodos. A tensão cisalhante aponta diferença máxima de 12% entre os resultados obtidos.