

5 ANÁLISES NUMÉRICAS

5.1 Apresentação

Neste trabalho, os pisos industriais de concreto foram projetados estruturalmente para um galpão cuja principal finalidade é o estoque de mercadorias, sendo o transporte realizado por meio de empilhadeiras com rodames pneumáticos e eixo de rotação simples e dupla. Foram projetados três tipos de pisos industriais – concreto simples, concreto com armadura distribuída e concreto estruturalmente armado; sendo que para cada tipo dimensionado há quatro configurações diferentes de base elástica (sistema subleito + sub-base) – ver Anexo B.

Foram definidos quatro modelos de placas de concreto simples com as bordas livres e apoiadas sobre base elástica, de modo a representar o modelo analítico proposto por Westergaard (1926) e, conseqüentemente, avaliar os esforços solicitantes máximos (momentos fletores máximos - $M_{máx}$) e as deflexões máximas ($\omega_{máx}$) quando essas estruturas são submetidas à ação direta de carregamentos estáticos e móveis, mais especificamente, o tráfego de empilhadeiras com rodames pneumáticos e com eixos de rotação simples e dupla.

A princípio, fundamentando-se no procedimento de analogia de grelha que, consiste em substituir a placa por uma malha equivalente de vigas (grelha equivalente), foram desenvolvidos modelos unidimensionais – vigas de concreto sobre base elástica, com o emprego do programa *FTOOL versão 3.00* (www.tecgraf.puc-rio.br/ftool).

Posteriormente, foram desenvolvidos modelos bidimensionais – placas de concreto sobre base elástica, com o emprego do programa *SAP 2.000 versão 14.2*. No presente estudo, o sistema subleito + sub-base como um meio elástico é representado por um conjunto de molas linearmente elásticas, mutuamente independentes, discretas e rigorosamente espaçadas entre si (Modelo de Winkler). Para a modelagem numérica das placas de concreto, adotou-se o elemento *SHELL* cuja forma é definida por quatro nós, onde cada nó possui 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação). No tocante a dimensão da malha, para os casos de carga estática - representação do Modelo Analítico de Westergaard e de carga

móvel – tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples, adotou-se um elemento quadrático de 25 x 25 cm². Já para os casos de carga móvel – tráfego de empilhadeiras com eixo de rodagem dupla, adotou-se um elemento quadrático de 5 x 5 cm².

No geral, as principais descrições dos modelos numéricos são apresentadas no Anexo C. Os modelos numéricos e as análises dos resultados são apresentadas ao longo deste capítulo.

5.2 Resultados teóricos: Aplicação do modelo analítico de Westergaard (1926)

As equações apresentadas pelo modelo analítico de Westergaard (1926) se destinam a investigar as tensões (σ) e as deflexões (ω) geradas em uma placa de concreto quando aplicada uma carga (P) uniformemente distribuída sobre uma pequena área circular ou semicircular com raio a , para os casos de carga situada no canto (Caso I), no interior (Caso II) e na borda (Caso III) da placa, conforme ilustra a Figura 4.5.

No dimensionamento dos pisos industriais de concreto, considera-se que as cargas estejam posicionadas no interior da placa (Caso II), admitindo-se que há transferência para as placas adjacentes através das juntas. Segundo alguns autores, pode-se considerar como carga interna uma carga situada cerca de uma vez o raio de rigidez do piso (l) (Equação 4.14).

Para quatro modelos distintos de placas isoladas de concreto simples com bordas livres e apoiadas sobre base elástica, ao se aplicar a carga P nas posições indicadas (Casos I, II e III) e também, os demais parâmetros definidos nos projetos estruturais (Anexo B), através das equações desenvolvidas por Westergaard (1926) é possível calcular os momentos fletores máximos ($M_{máx}$), as tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{máx}$) e as deflexões máximas ($\omega_{máx}$).

Os resultados teóricos são apresentados a seguir.

5.2.1 Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$)

O momento fletor máximo do concreto ou, em outras palavras, o momento de fissuração do concreto simples depende, fundamentalmente, da resistência à tração na flexão do concreto ($f_{ctM,k}$). Segundo Rodrigues et al. (2006), faz-se:

a) Para os Modelos I e III:

$$M_1 = \frac{f_{ctM,k} \times I_g}{y_t} = \frac{f_{ctM,k} \times (b \times h^2)}{6,00} = \frac{4,13 \times 10^3 \times 1,00 \times (0,210^2)}{6,00} = 30,35 \text{ kN x m/m} \quad (5.1)$$

b) Para os Modelos II e IV:

$$M_2 = \frac{f_{ctM,k} \times I_g}{y_t} = \frac{f_{ctM,k} \times (b \times h^2)}{6,00} = \frac{4,13 \times 10^3 \times 1,00 \times (0,200^2)}{6,00} = 27,53 \text{ kN x m/m} \quad (5.2)$$

onde:

M_1 e M_2 – momento fletor máximo do concreto (momento de fissuração do concreto simples);

$f_{ctM,k}$ – resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) do concreto;

I_g – momento de inércia da seção não fissurada;

y_t – distância da linha neutra a fibra mais tracionada.

Os momentos fletores máximos ($M_{m\acute{a}x}$) dos quatro modelos teóricos analisados são apresentados e comparados ao respectivo momento fletor máximo do concreto (M_1 ou M_2) através da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Momento fletor máximo – $M_{m\acute{a}x}$ (kNm/m): Resultados teóricos

Modelo	Caso I	Caso II	Caso III
	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo
Momento fletor máximo do concreto (M_1)	30,35		
I	18,43	13,12	28,73
III	16,91	11,87	25,70
Momento fletor máximo do concreto (M_2)	27,53		
II	19,34	13,66	29,66
IV	18,41	12,93	27,89

Observa-se no Caso I (momento fletor negativo máximo) e no Caso II (momento fletor positivo máximo) que, para todos os modelos analisados, os valores dos momentos fletores máximos do concreto (momentos de fissuração do concreto simples), M_1 e M_2 , são muito superiores aos respectivos valores dos momentos fletores máximos calculados.

No Caso III (momento fletor positivo máximo), no tocante aos Modelos I e III, observa-se que o momento fletor máximo do concreto M_1 é respectivamente 5,34% e 15,32% superior aos momentos fletores máximos calculados. Já, para os Modelos II e IV, o momento fletor máximo do concreto M_2 é respectivamente 7,74% e 1,31% inferior aos momentos fletores máximos calculados.

Rodrigues et al. (2006), a partir de diversos estudos teóricos e experimentais, através da Tabela 5.2, apresenta relações proporcionais estabelecidas entre os momentos fletores gerados pelo posicionamento da carga P no canto (Caso I), no interior (Caso II) e na borda (Caso III) da placa de concreto simples. Ressalta-se que a mesma também é válida para as deflexões sob as mesmas condições de carregamento.

Tabela 5.2 – Esforços e deflexões relativas em uma placa de concreto simples (borda livre), Rodrigues et al. (2006)

Posição da carga	Momento relativo	Deflexão relativa
Caso I - Canto da placa	$-1,70 M_{II}$	$7,00 D_{II}$
Caso II - Interior da placa	M_{II}	D_{II}
Caso III - Borda da placa	$2,00 M_{II}$	$3,00 D_{II}$

Obs.: M_{II} – momento fletor gerado pela carga P posicionada no interior da placa de concreto (Caso II); D_{II} – deflexão gerada pela carga P posicionada no interior da placa de concreto (Caso II).

Cria-se a mesma relação de proporção entre os momentos fletores máximos calculados no presente trabalho e, chega-se aos resultados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Momentos fletores máximos relativos à M_{II} ; Resultados teóricos

Modelo	Caso I	Caso III
I	$-1,405 M_{II}$	$2,190 M_{II}$
II	$-1,416 M_{II}$	$2,172 M_{II}$
III	$-1,425 M_{II}$	$2,165 M_{II}$
IV	$-1,424 M_{II}$	$2,158 M_{II}$

Obs.: M_{II} – momento fletor gerado pela carga P posicionada no interior da placa de concreto (Caso II).

As proporções entre os valores dos momentos fletores máximos calculados para os quatro modelos analisados no Caso I em relação aos valores dos momentos fletores máximos calculados para os quatro modelos analisados no Caso II são, em média, 16,62% inferiores ao valor esperado (-1,70 M_{II}).

Já, as proporções entre os valores dos momentos fletores máximos calculados para os quatro modelos analisados no Caso III em relação aos valores dos momentos fletores máximos dos quatro modelos analisados no Caso II são, em média, 8,56% superiores ao valor esperado (2,00 M_{II}).

5.2.2 Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$)

A tensão admissível (σ_{adm}) foi calculada através da relação (Anexo B):

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{ctM,k}}{F.S.} = \frac{4,13}{2,00} = 2,07 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

As tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) dos quatro modelos teóricos analisados são apresentadas e comparadas à tensão admissível (σ_{adm}) através da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Tensão de tração na flexão máxima – $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa): Resultados teóricos

Modelo	Face superior da placa		Face inferior da placa	
	Caso I		Caso II	Caso III
σ_{adm}	2,07			
I	2,51		1,78	3,91
II	2,63		1,86	4,03
III	2,30		1,62	3,50
IV	2,50		1,76	3,79

Para os quatro modelos analisados no Caso I, observa-se que o valor da tensão admissível (σ_{adm}) é, em média, 20,05% inferior aos valores das tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculadas. O valor mais próximo ao valor da tensão admissível (σ_{adm}) é o resultado teórico apresentado pelo Modelo III (11,11%) e o valor menos próximo é o resultado teórico apresentado pelo Modelo II (27,05%).

Para os quatro modelos analisados no Caso II, observa-se que o valor da tensão admissível (σ_{adm}) é, em média, 15,22% superior aos valores das tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculadas. Ressalta-se que o Caso II (carga

concentrada no interior da placa) é a posição adotada nos procedimentos para o dimensionamento das placas de concreto simples para pisos industriais (Método da PCA).

E, por fim, para os quatro modelos analisados no Caso III, observa-se que o valor da tensão admissível (σ_{adm}) é, em média, 83,94% inferior aos valores das tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculadas.

Balbo realizou inúmeros trabalhos no campo dos pavimentos rodoviários de concreto, sendo os mesmos conhecidos e mencionados como referência a nível nacional e internacional. Entre eles, Balbo realizou diversas simulações das tensões de tração máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) através das equações propostas pelo modelo analítico de Westergaard (1926) para pavimentos rodoviários de concreto simples. Balbo (2009) afirma que para uma mesma carga posicionada no interior (Caso II), na borda (Caso III) e no canto (Caso I) da placa, infere-se que a carga de borda (Caso III) seria o caso mais crítico e a carga interior (Caso II) à placa o caso menos crítico. Logo, de acordo com o mencionado, pode-se verificar que os resultados teóricos apresentados acima se encontram conforme o esperado.

Ainda, observa-se que a variação entre os valores das tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculadas é muito pequena quando se remete ao fato da grande variação entre os módulos de reação da base elástica (k_{inc}) da placa que, para os modelos estudados neste trabalho, varia de 40,00 a 100,00 MPa/m. Uma possível justificativa, ainda de acordo com as pesquisas realizadas por Balbo (2009), advém da afirmativa que para uma faixa do módulo de reação da base elástica (k_{inc}) da placa entre 55,00 e 138,00 MPa/m, nota-se pouca interferência deste nas tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculadas. Novamente, de acordo com o mencionado, pode-se verificar que os resultados teóricos apresentados anteriormente se encontram conforme o esperado.

5.2.3 Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$)

As deflexões máximas ($\omega_{m\acute{a}x}$) dos quatro modelos teóricos analisados são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Deflexões máximas – $\omega_{m\acute{a}x}$ (mm): Resultados teóricos

Modelo	Caso I	Caso II	Caso III
I	1,868	0,244	0,819
II	1,600	0,214	0,712
III	1,130	0,153	0,509
IV	1,223	0,167	0,553

Observa-se que os maiores valores de deflexão ocorrem para os quatro modelos analisados no Caso I (carga posicionada no canto da placa). O Modelo I é o que apresenta o maior valor de deflexão entre os quatro (1,868 mm) e o Modelo III é o que apresenta o menor valor de deflexão entre os quatro (1,130 mm).

Já, os menores valores de deflexão ocorrem para os quatro modelos analisados no Caso II (carga posicionada no interior da placa). Novamente, merece destaque o Modelo I com o maior valor de deflexão entre os quatro modelos analisados (0,244 mm) e o Modelo III com o menor valor de deflexão entre os quatro modelos analisados (0,167 mm).

Por fim, para o Caso III (carga posicionada na borda da placa), observa-se o mesmo comportamento em relação aos modelos analisados, com destaque para os Modelos I (0,819 mm) e para o Modelo III (0,509 mm).

Nota-se que há uma relação direta entre o valor do módulo de reação da base elástica (k_{inc}) da placa de concreto simples e a deflexão ocorrida após aplicação da carga P para os quatro modelos analisados. Quanto maior o valor do módulo de reação da base elástica (k_{inc}) da placa, menor a deflexão no ponto de aplicação da carga P e vice-versa. Por exemplo, ao analisar os resultados teóricos apresentados pelos quatro modelos estudados (Tabela 5.5), observa-se que o Modelo I ($k_{inc} = 40,00$ MPa/m) é o que apresenta a maior deflexão para os três casos de posicionamento da carga P . Já, o Modelo III ($k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o modelo que apresenta a menor deflexão para todos os casos estudados.

Referente aos limites para deslocamentos, de acordo com a norma ABNT NBR 6.118/2007 (Tabela 13.2), de forma sucinta, considera-se a Tabela 5.6:

Tabela 5.6 – Limites para deslocamentos em estruturas de concreto, ABNT NBR 6.118/2007

Tipo de efeito	Razão da limitação	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Efeitos estruturais em serviço	Pavimentos que devem permanecer planos	Total	//350 + contraflecha
		Ocorrido após a construção do piso	//600

Toma-se como valor de contraflecha o limite recomendado pela norma: $l/350$. Então, faz-se conforme a Tabela 5.7:

Tabela 5.7 – Limites para deslocamentos segundo ABNT NBR 6.118/2007

Vão (l) – [m]	Deslocamento a considerar	Deslocamento de projeto ($\omega_{projeto}$) – [mm]
5,00	Total	28,60
2,50		14,30
5,00	Ocorrido após a construção do piso	8,34
2,50		4,17

Pode-se observar que para todos os modelos analisados no Caso II (carga posicionada no interior da placa de concreto) as deflexões máximas calculadas estão na faixa de valores aceitáveis segundo a norma ABNT NBR 6.118/2007.

Ainda, segundo artigo técnico publicado na Revista Recuperar (setembro/outubro, 2006), especialistas sugerem deflexões limites e respectivos pareceres técnicos de modo a auxiliar na verificação e controle das deflexões em juntas de pisos industriais de concreto, Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Desempenho das juntas de pisos industriais de concreto, Revista Recuperar (setembro/outubro, 2006)

Desempenho das juntas de pisos industrial de concreto		
Deflexão (mm)	Classificação	Parecer técnico
0,00 a 0,150	Modo 1	Excelente
0,150 a 0,250	Modo 2	Deflexão aceitável
0,250 a 0,500	Modo 3	Sugestão: Serviços de consolidação do solo, sob as placas, aperfeiçoarão o funcionamento das juntas. A não intervenção, nesta fase costuma ser tolerável por um prazo de 5 a 7 anos, podendo ou não ocorrer pequenas trincas nas juntas
0,500 a 1,00	Modo 4	Grave. Deflexão capaz de fraturar as bordas das juntas e, principalmente, começar a criar problemas nas empilhadeiras
Acima de 1,00	Modo 5	Inevitável à deterioração da junta e da empilhadeira. Esta situação geralmente é progressiva

De acordo com os valores apresentados na Tabela 5.8, estabelece-se como parâmetro para verificação do desempenho das juntas das placas de concreto analisadas neste trabalho uma deflexão limite (ω_{junta}) equivalente a 0,250 milímetros. A priori, observa-se que para todos os modelos analisados no Caso III (carga posicionada na borda da placa de concreto), os valores de deflexão máxima

calculados estão acima do valor aceitável fato que é desfavorável para os requisitos segurança e durabilidade do piso industrial de concreto.

Agora, conforme a Tabela 5.2, estabelece-se uma relação de proporção entre as deflexões no canto (Caso I) e na borda (Caso III) da placa com as deflexões no interior (Caso II) para os quatro modelos analisados e, chega-se aos resultados apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Deflexões máximas relativas à D_{II} – Resultados teóricos

Deflexões máximas relativas a D_{II}		
Modelo	Caso I	Caso III
I	7,65 D_{II}	3,35 D_{II}
II	7,49 D_{II}	3,33 D_{II}
III	7,37 D_{II}	3,32 D_{II}
IV	7,33 D_{II}	3,31 D_{II}

Obs.: D_{II} – deflexão gerada pela carga P posicionada no interior da placa de concreto (Caso II).

As proporções entre os valores das deflexões máximas calculadas para os quatro modelos estudados no Caso I em relação aos valores das deflexões máximas calculadas para os quatro modelos estudados no Caso II são, em média, 6,57% superiores ao valor esperado (7,00 D_{II}).

As proporções entre os valores das deflexões máximas calculadas para os quatro modelos estudados no Caso III em relação aos valores das deflexões máximas calculadas para os quatro modelos estudados no Caso II são, em média, 10,92% superiores ao valor esperado (3,00 D_{II}).

5.3 Modelos numéricos

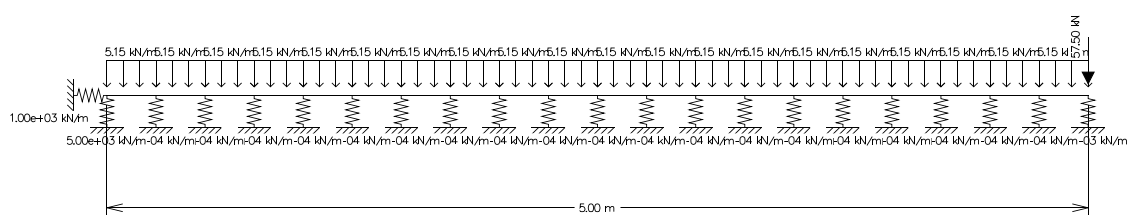
5.3.1 Modelos unidimensionais – *Ftool* versão 3.00

5.3.1.1 Modelo I

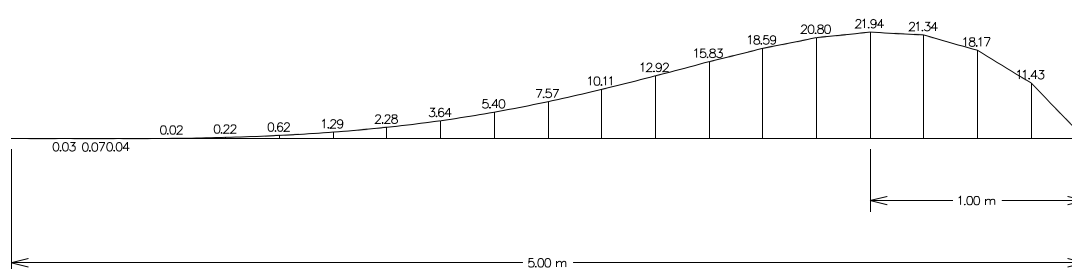
a) Carga estática – Semi-eixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

a.1) Diagrama de momento fletor ($M_{máx}$) e Linha elástica ($\omega_{máx}$) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)

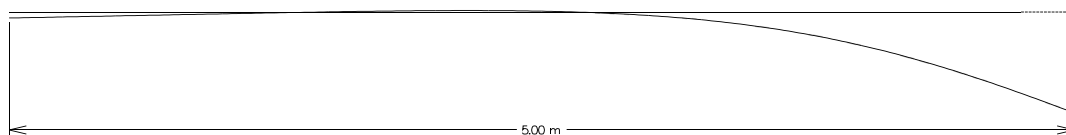
a.1.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento – Combinação 1: $g_1 = 5,15$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN

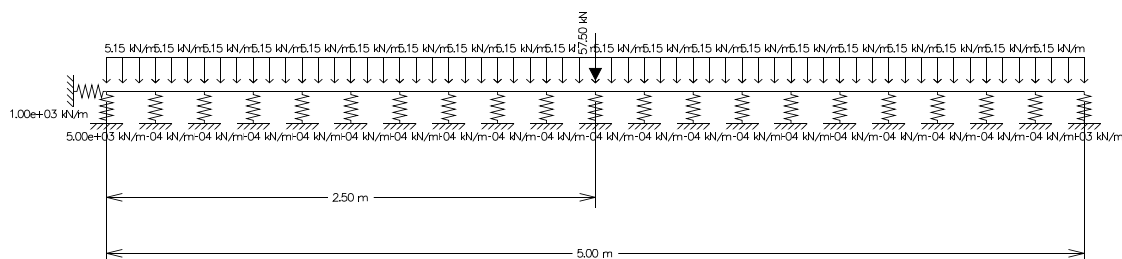


Momento fletor negativo máximo – $M_{máx} = 21,94$ kNm

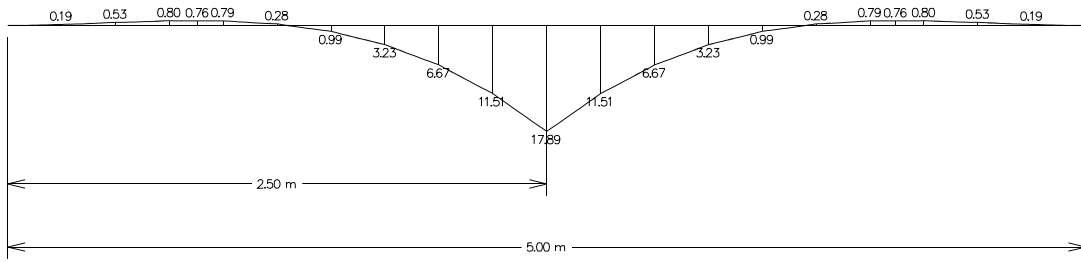


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 2,490$ mm

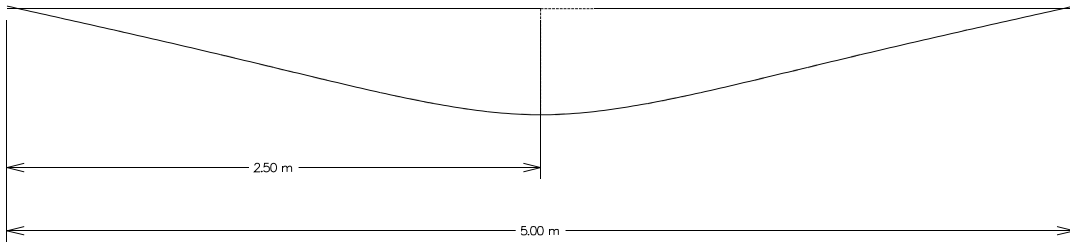
a.1.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN



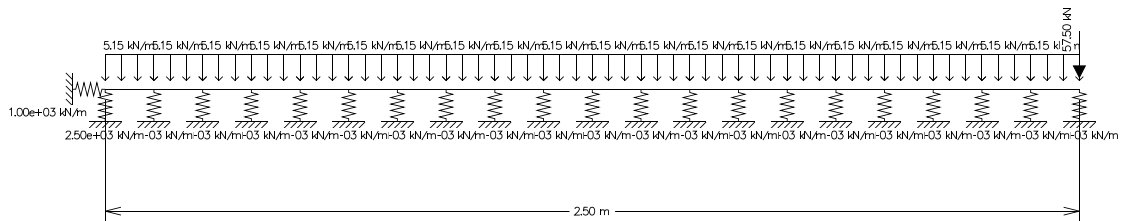
Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 17,89 \text{ kNm}$



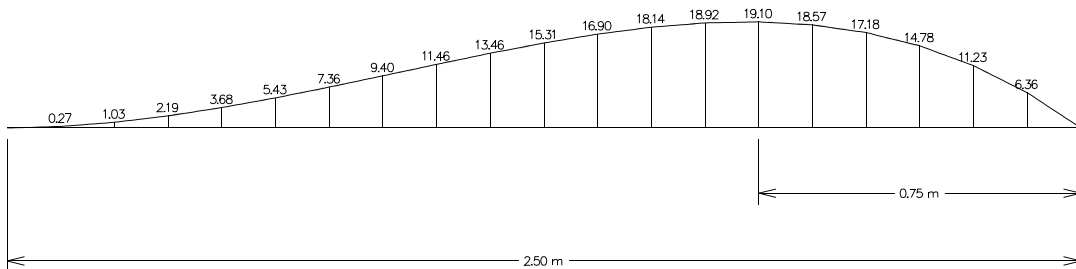
Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,771 \text{ mm}$

a.2) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$

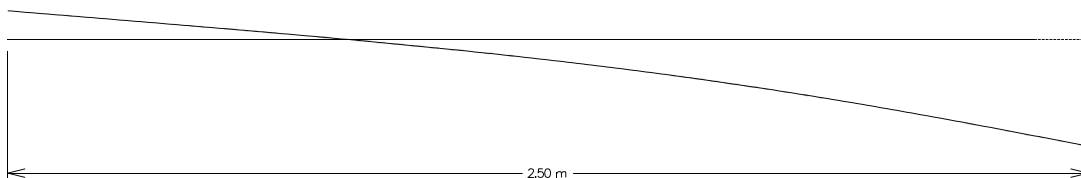
a.2.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação1: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$

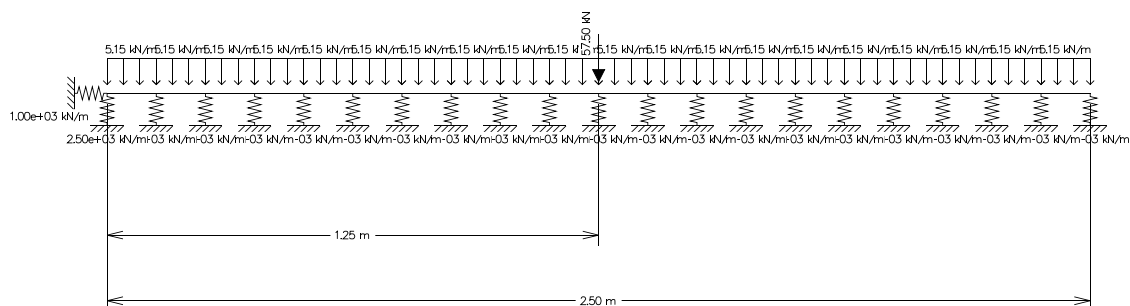


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 19,10 \text{ kNm}$

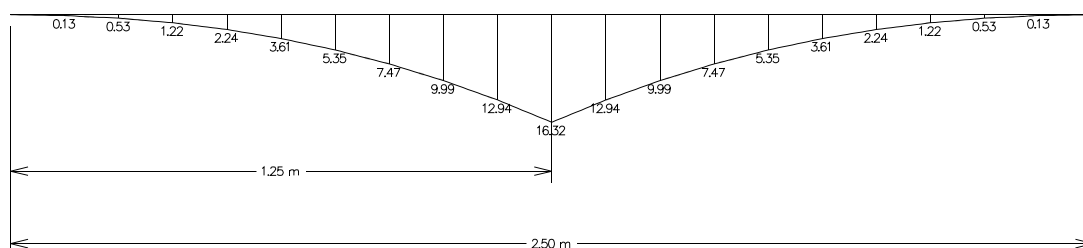


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 2,780 \text{ mm}$

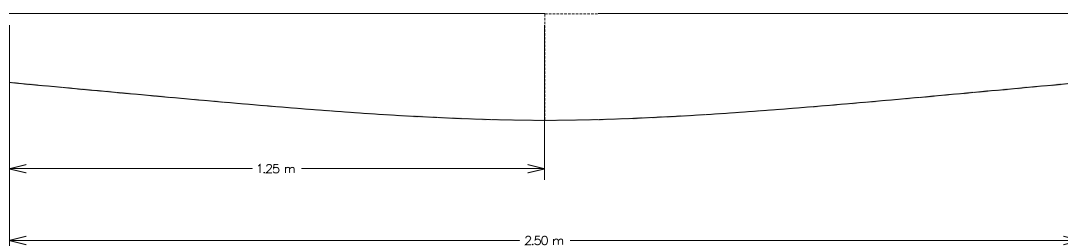
a.2.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$



Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 16,32 \text{ kNm}$

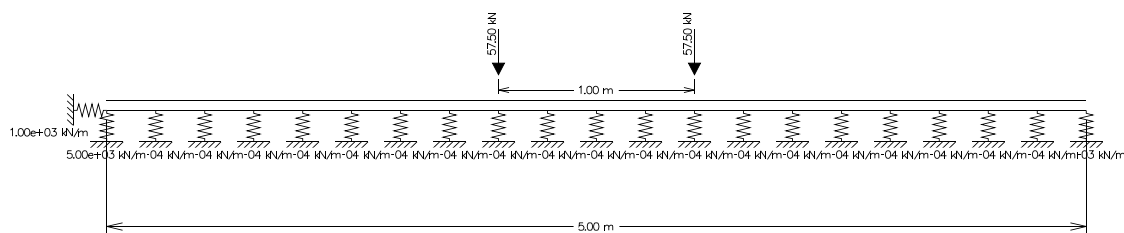


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,822 \text{ mm}$

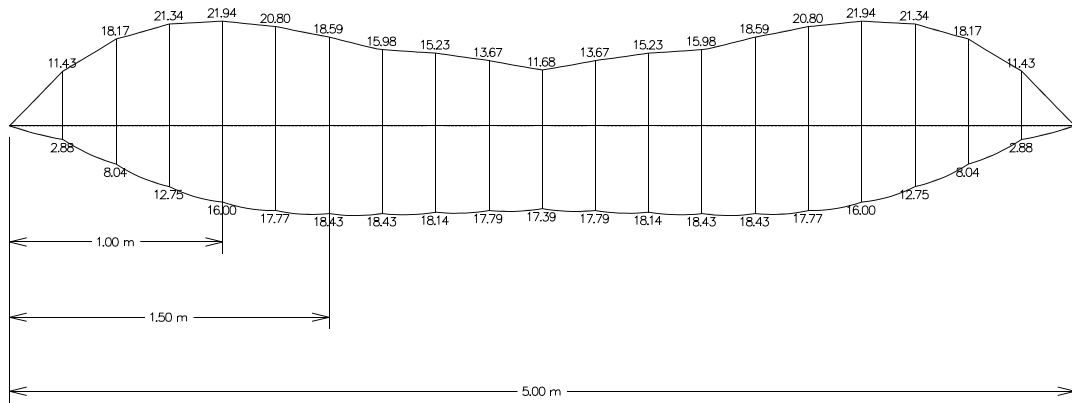
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00 \text{ cm}$

b.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00 \text{ m}$)



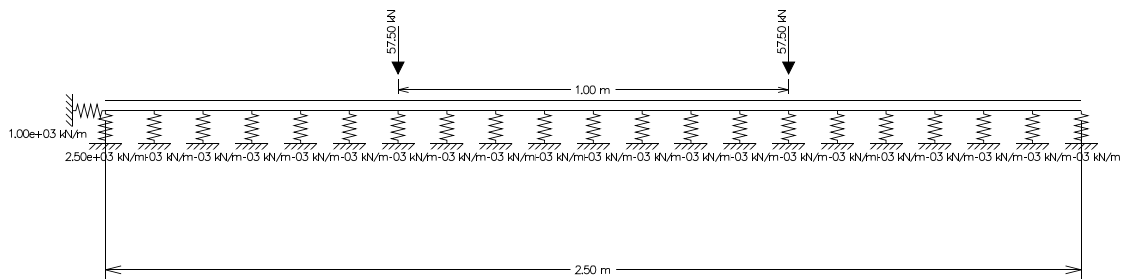
Carregamento – Combinação 3: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + p_1 = 2 \times 57,50 \text{ kN}$



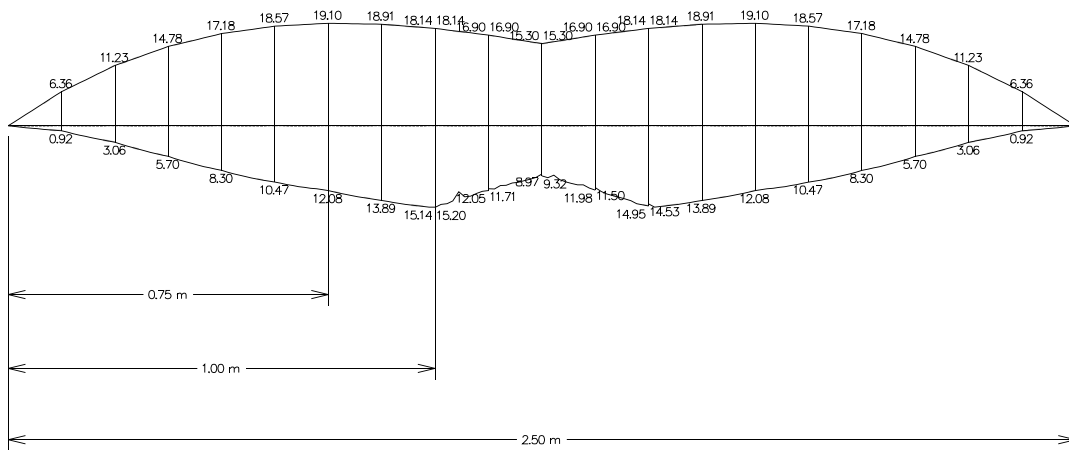
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 18,43 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 21,94 \text{ kNm}$

b.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$



Carregamento - Combinação 3: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + p_1 = 2 \times 57,50 \text{ kN}$



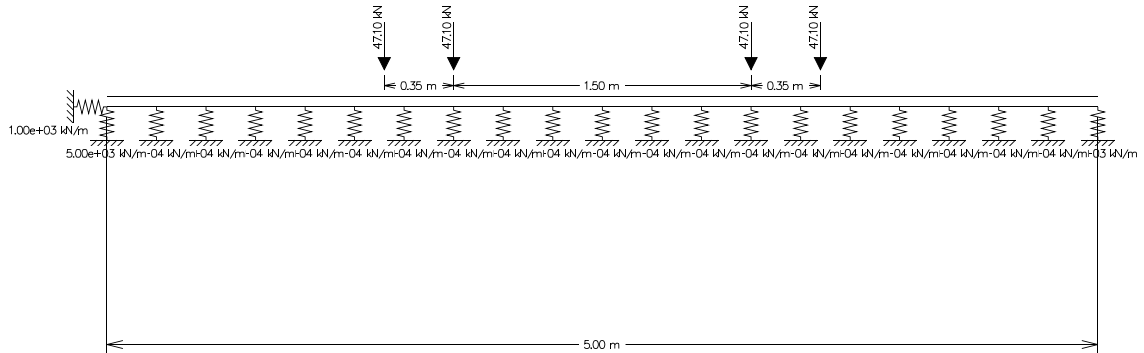
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 15,20 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 19,10 \text{ kNm}$

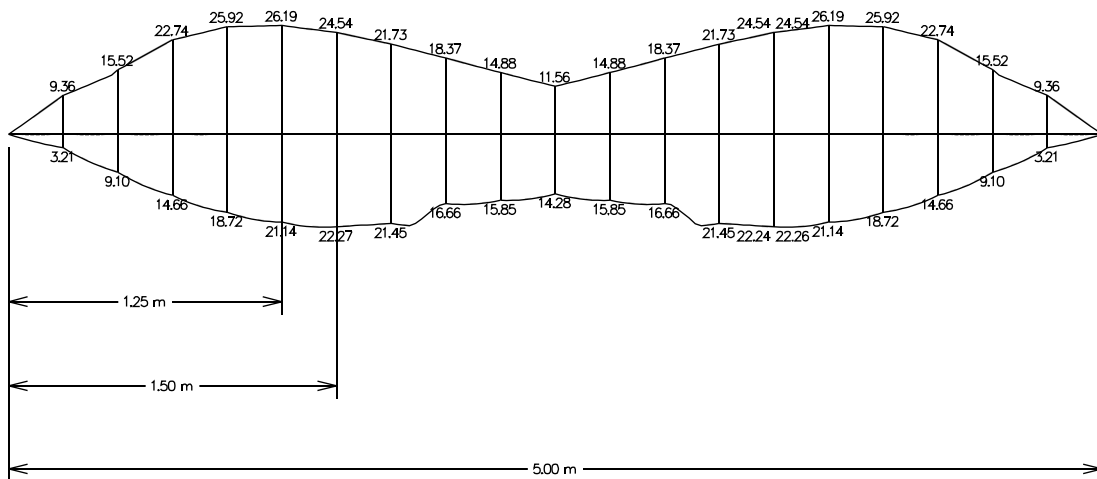
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

c.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)



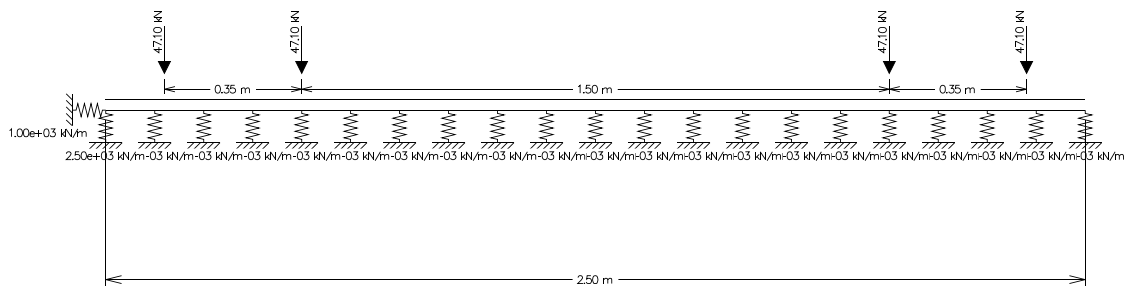
Carregamento – Combinação 4: $g_1 = 5,15$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN



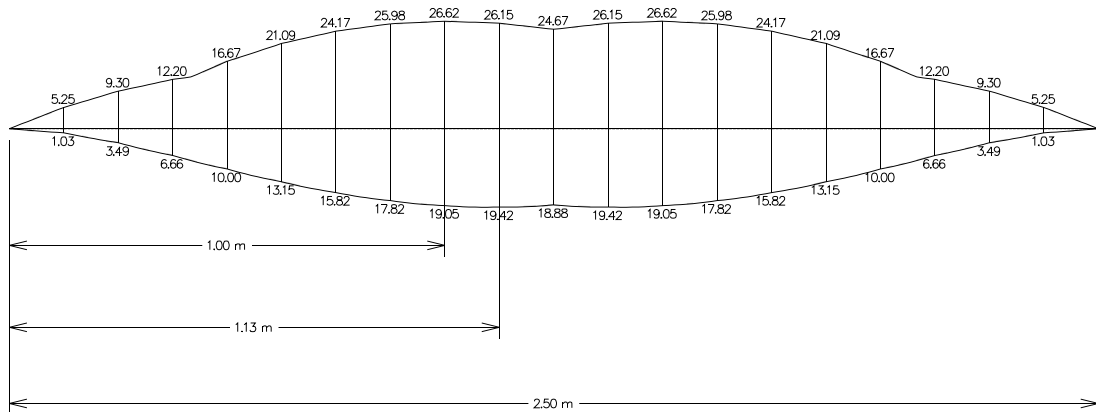
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 22,27$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 26,19$ kNm

c.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 4: $g_1 = 5,15$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN

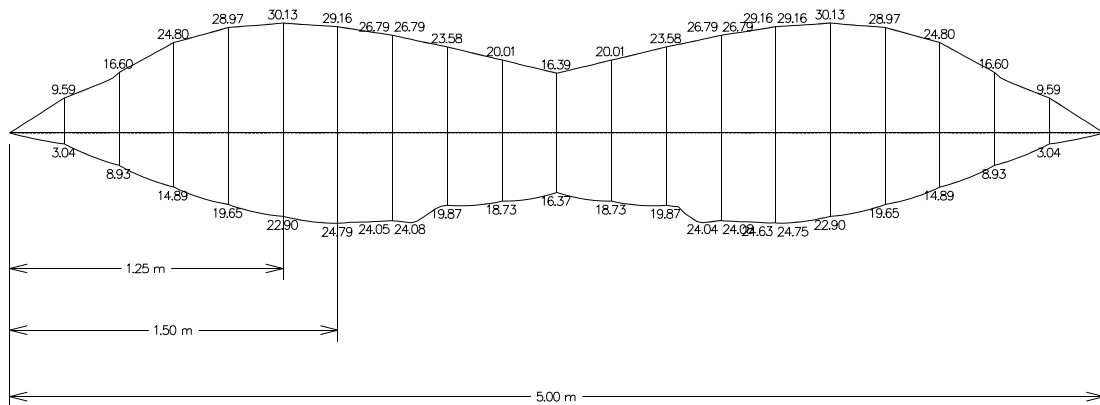


Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 19,42$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 26,62$ kNm

c.2) Espessura da placa de concreto simples – $h = 24,00$ cm

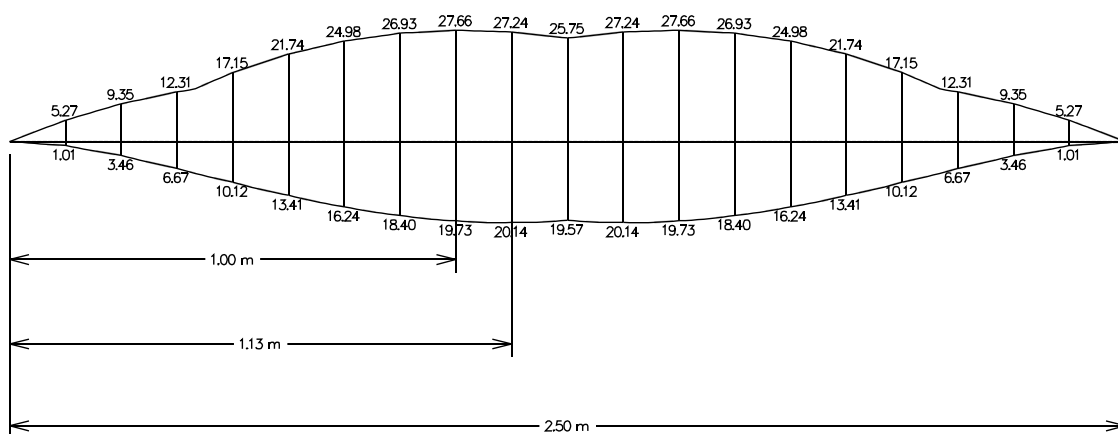
c.2.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($I_1 = 5,00$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 24,79$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 30,13$ kNm

c.2.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($I_2 = 2,50$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 20,14$ kNm

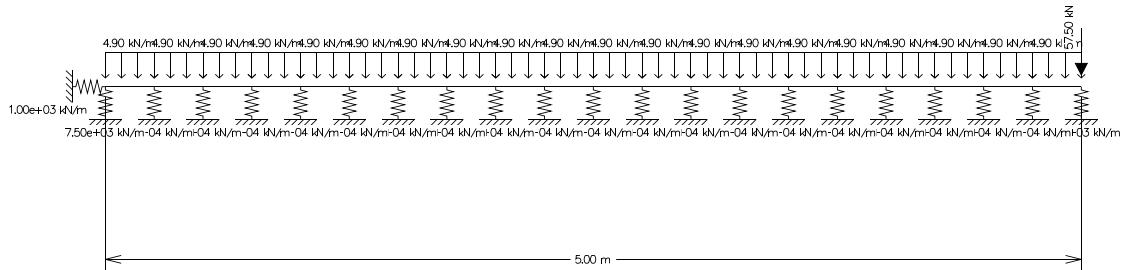
Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 27,66$ kNm

5.3.1.2 Modelo II

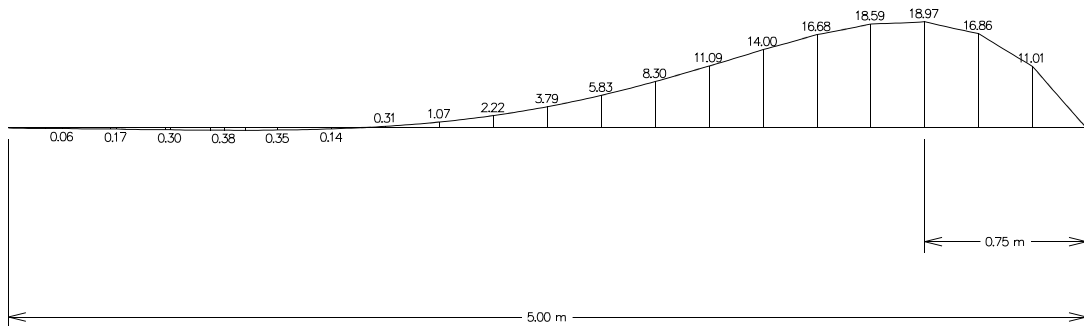
a) Carga estática – Semi-eixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

a.1) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)

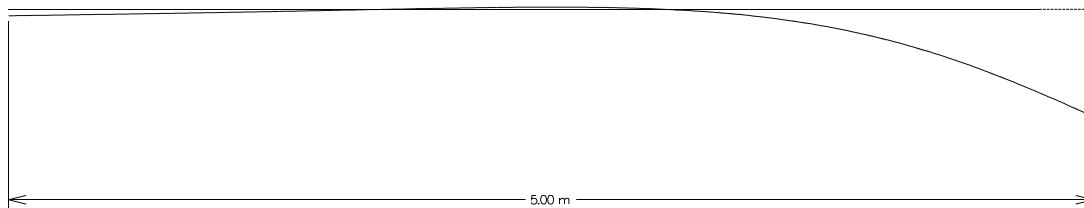
a.1.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN

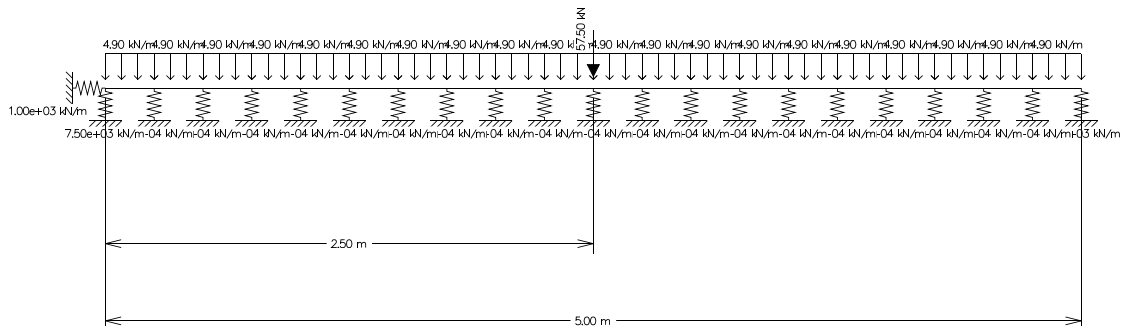


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 18,97$ kNm

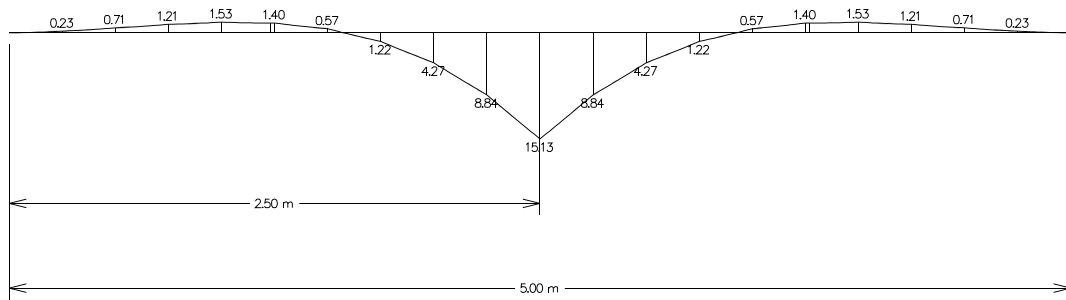


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,880$ mm

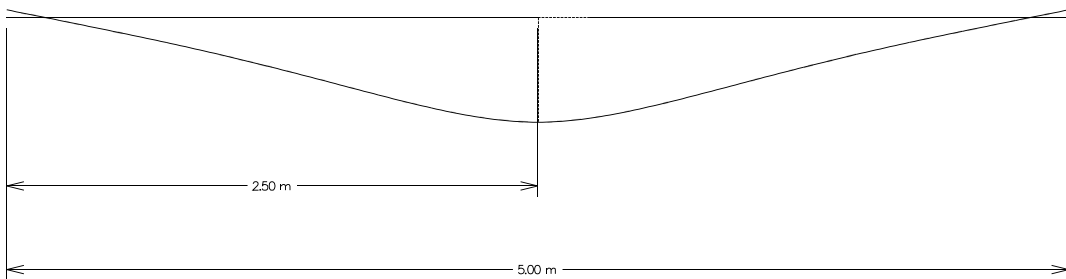
a.1.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN



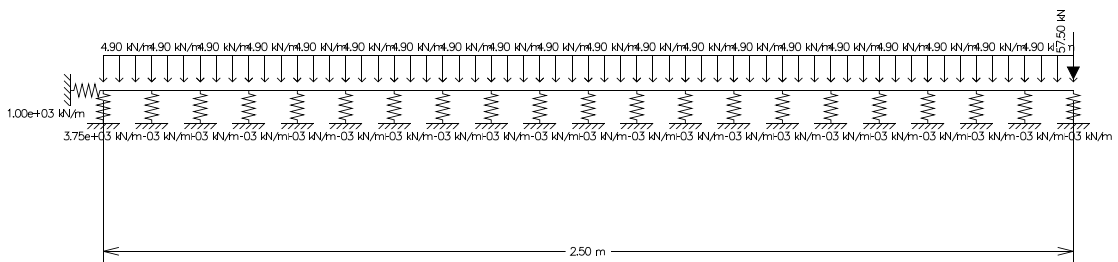
Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 15,13 \text{ kNm}$



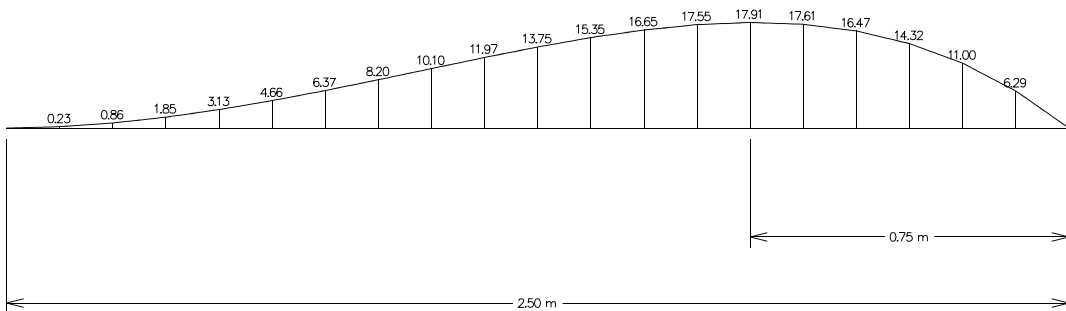
Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,563 \text{ mm}$

a.2) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$

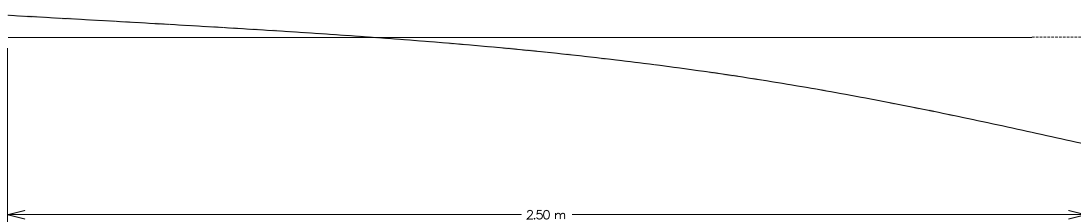
a.2.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$

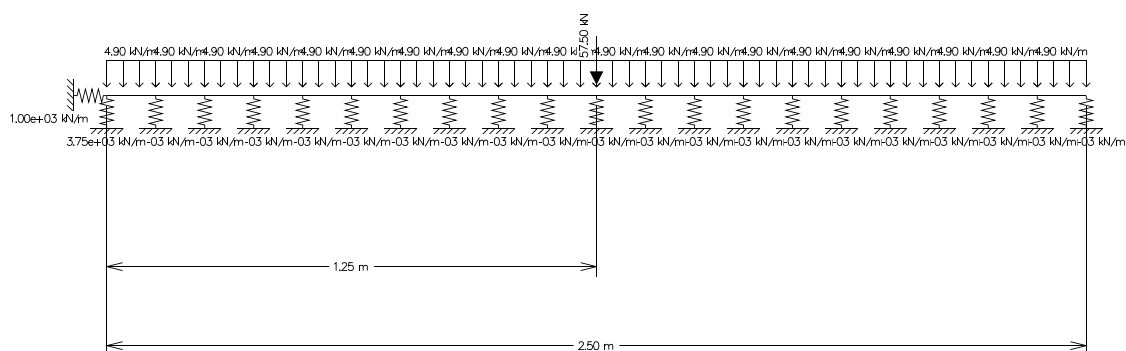


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 17,91 \text{ kNm}$

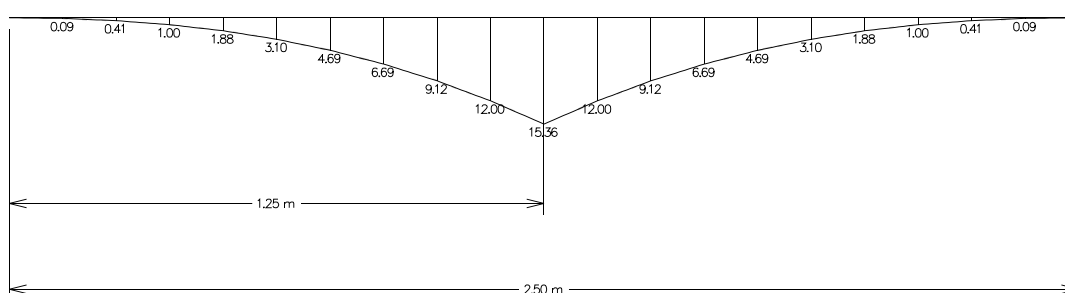


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,990 \text{ mm}$

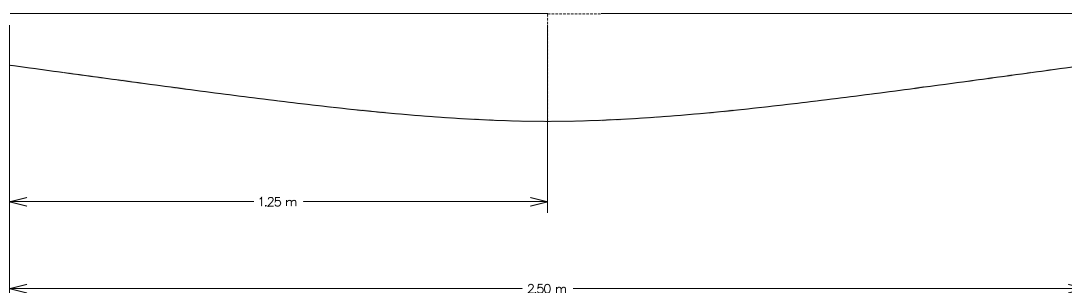
a.2.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$



Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 15,36 \text{ kNm}$

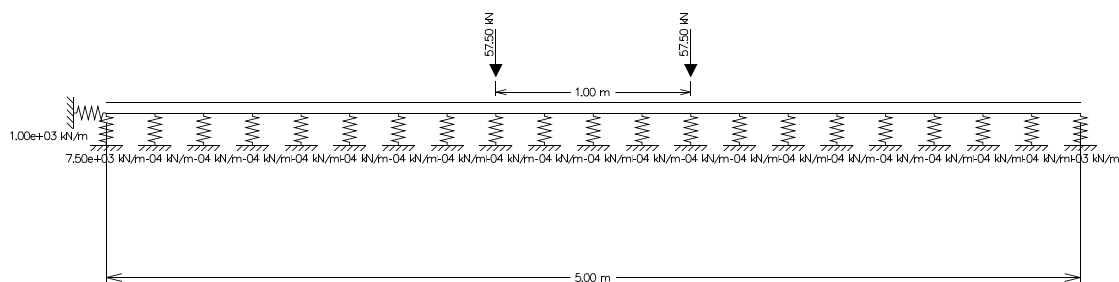


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,590 \text{ mm}$

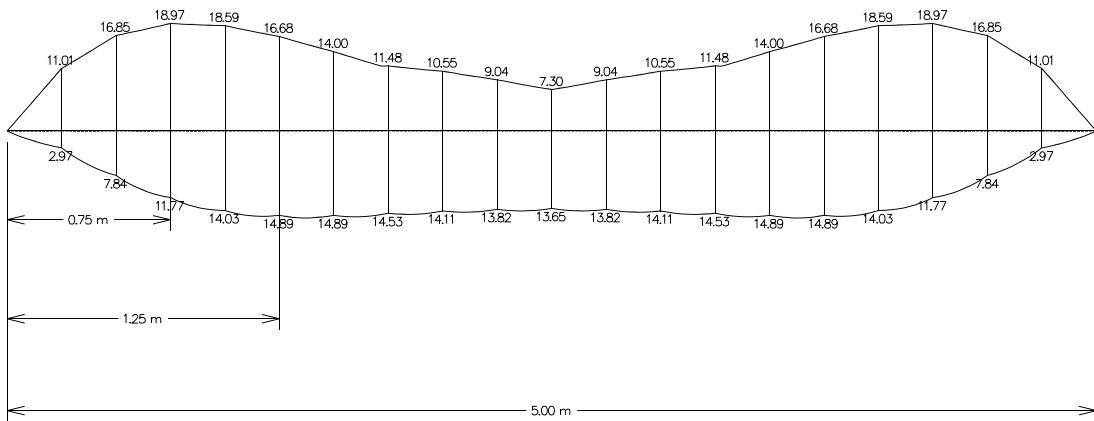
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00 \text{ cm}$

b.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00 \text{ m}$)



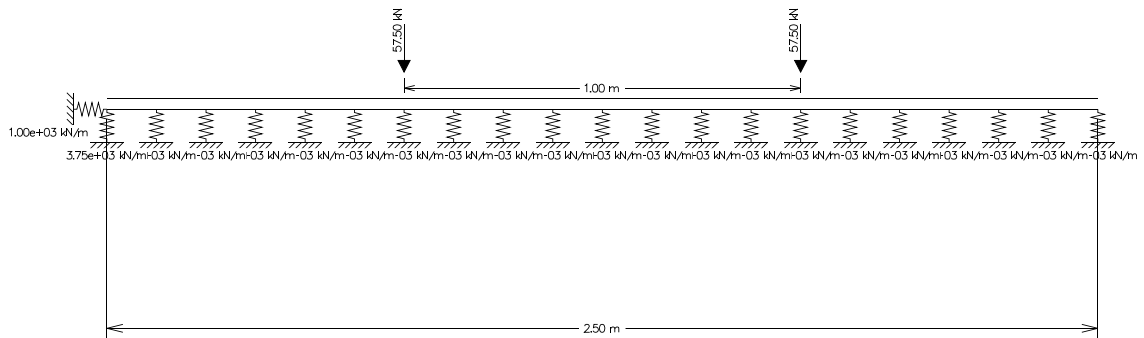
Carregamento - Combinação 5: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + p_1 = 2 \times 57,50 \text{ kN}$



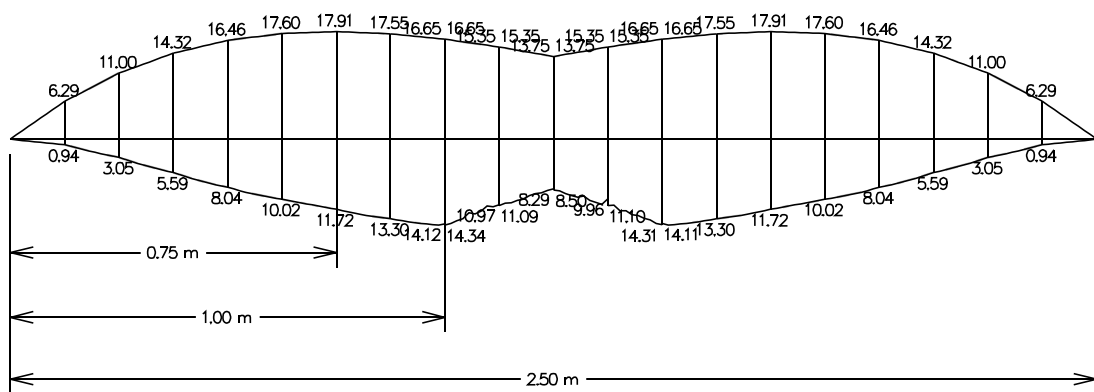
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 14,89 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 18,97 \text{ kNm}$

b.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$



Carregamento - Combinação 5: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + p_1 = 2 \times 57,50 \text{ kN}$



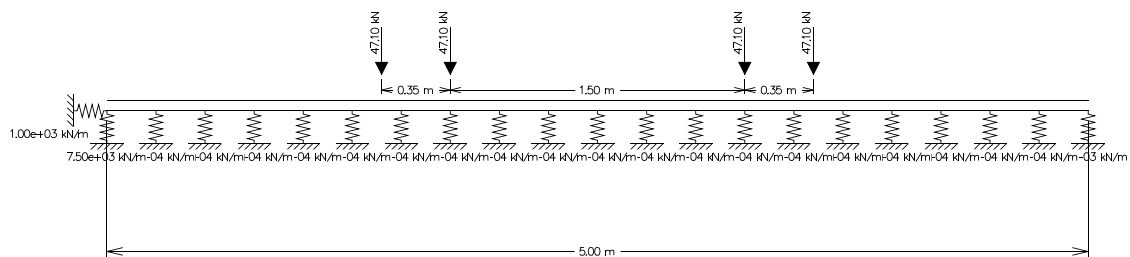
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 14,34 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 17,91 \text{ kNm}$

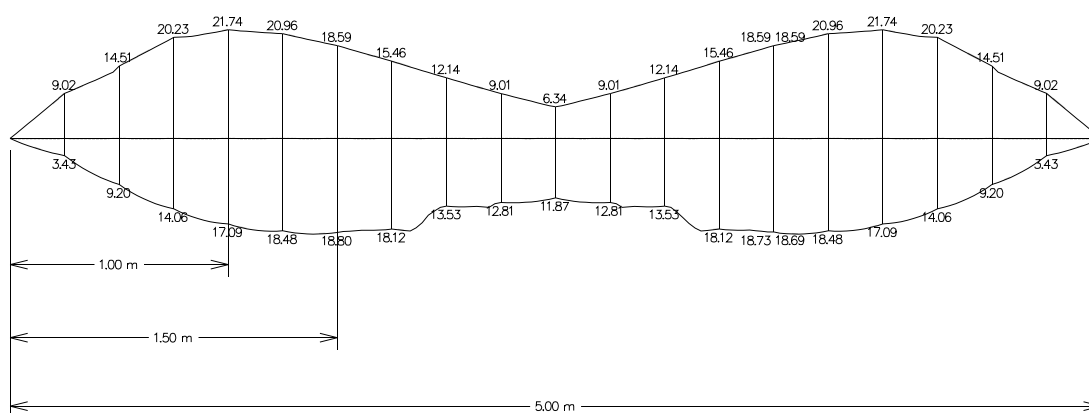
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

c.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)



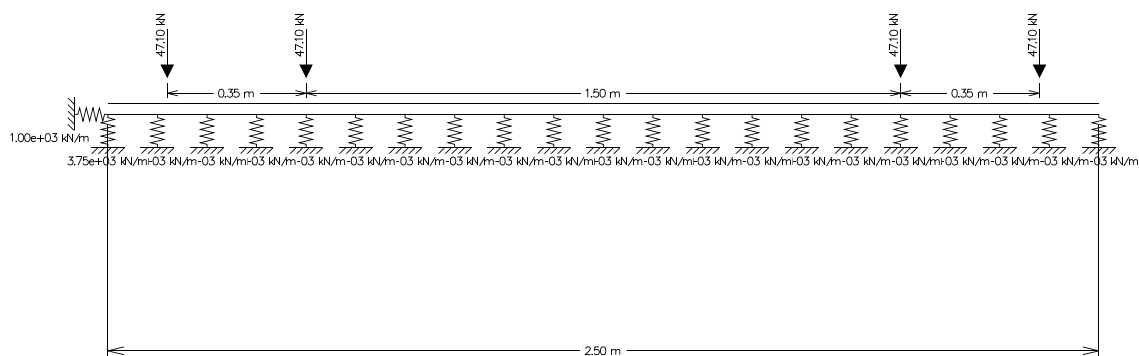
Carregamento - Combinação 6: $g_2 = 4,90$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN



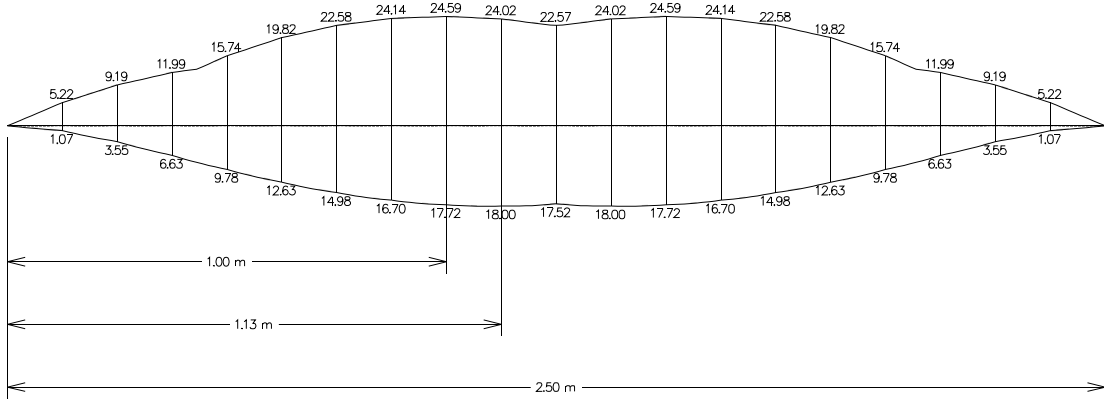
Momento fletor positivo máximo: $M_{máx}^+ = 18,80$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M_{máx}^- = 21,74$ kNm

c.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 6: $g_2 = 4,90$ kN/m + $p_2 = 4 \times 28,75$ kN

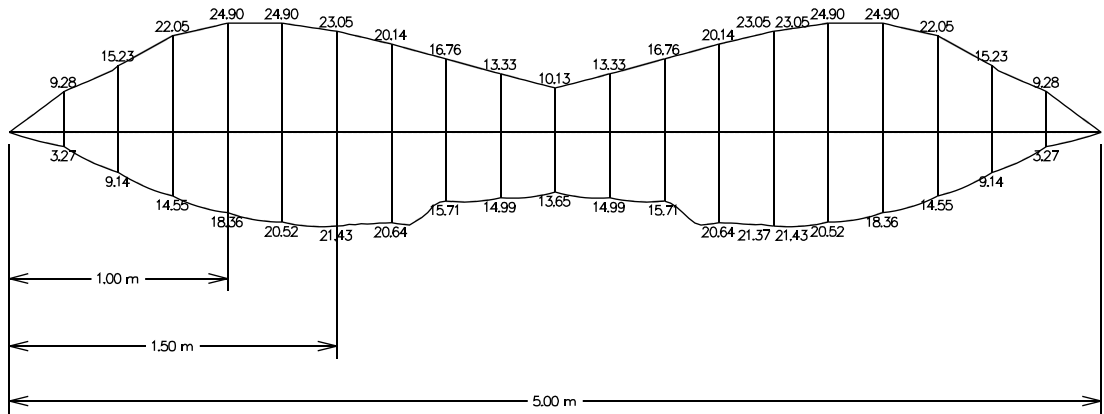


Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 18,00 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 24,59 \text{ kNm}$

c.2) Espessura da placa de concreto simples – $h = 23,00 \text{ cm}$

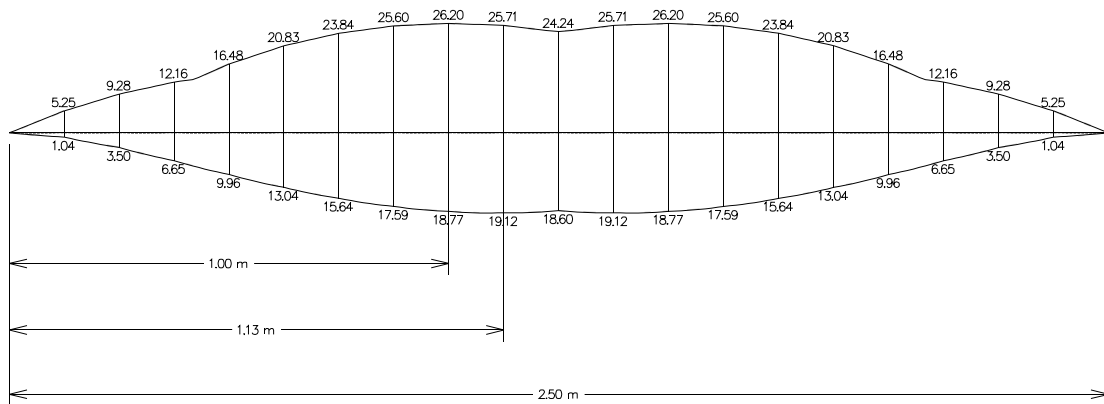
c.2.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00 \text{ m}$)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 21,43 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 24,90 \text{ kNm}$

c.2.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50 \text{ m}$)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 19,12 \text{ kNm}$

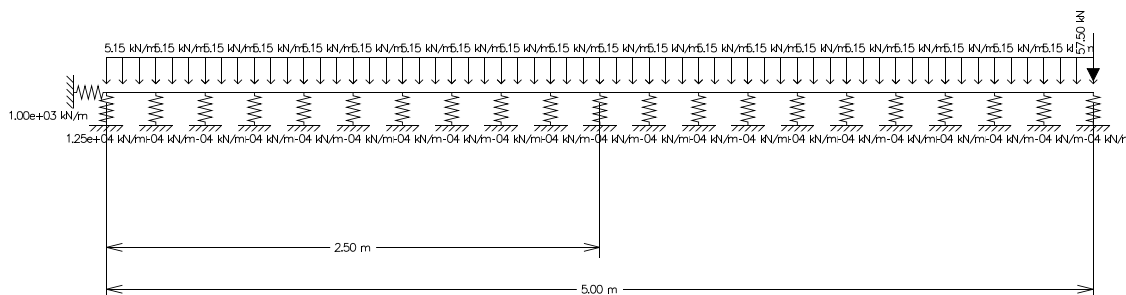
Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 26,20 \text{ kNm}$

5.3.1.3 Modelo III

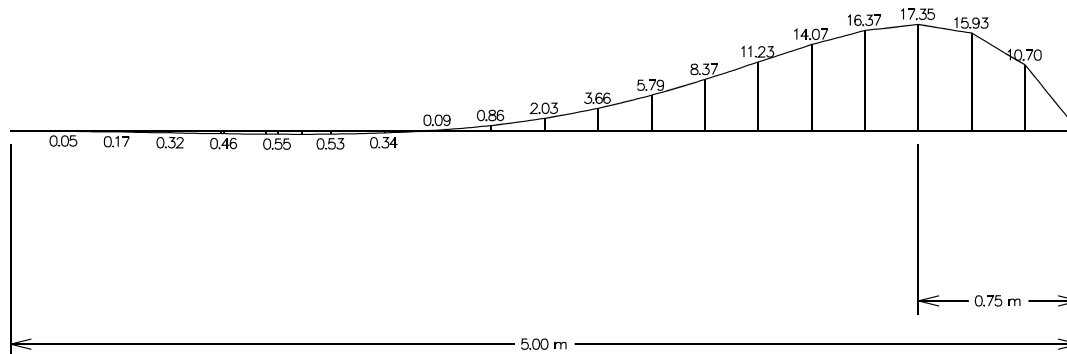
a) Carga estática – Semi-eixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

a.1) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga L ($I_1 = 5,00$ m)

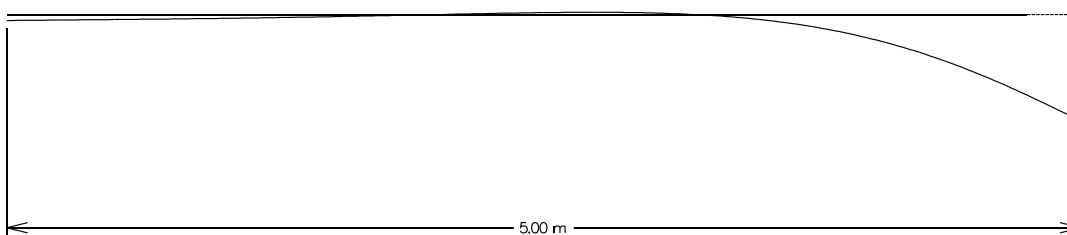
a.1.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN

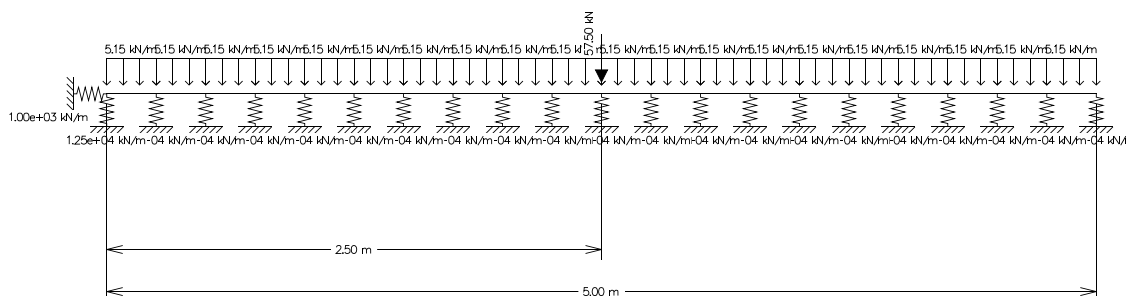


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 17,35$ kNm

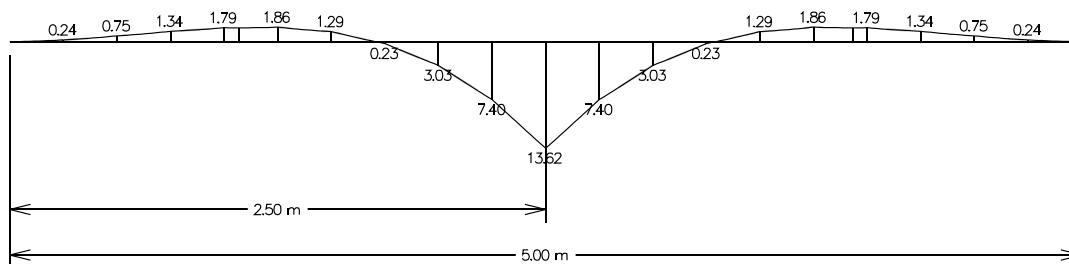


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,220$ mm

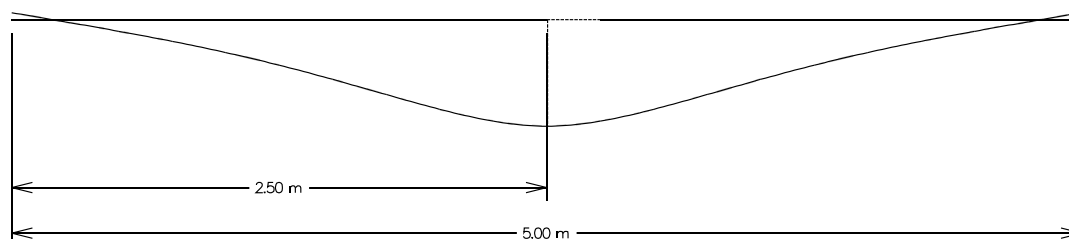
a.1.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN



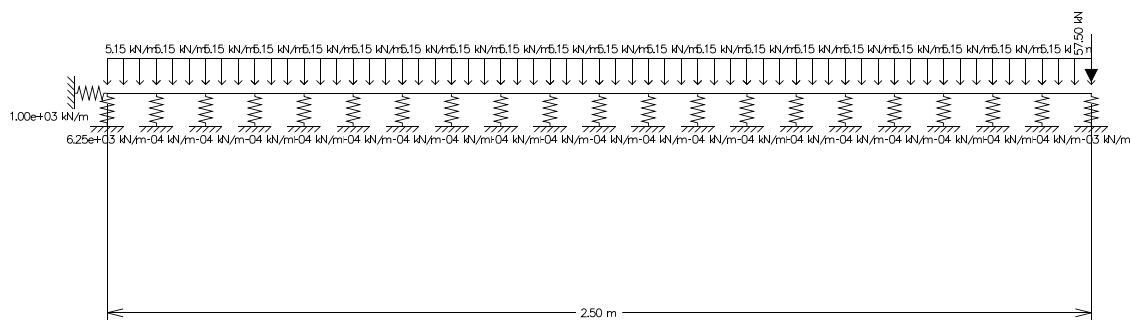
Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 13,62 \text{ kNm}$



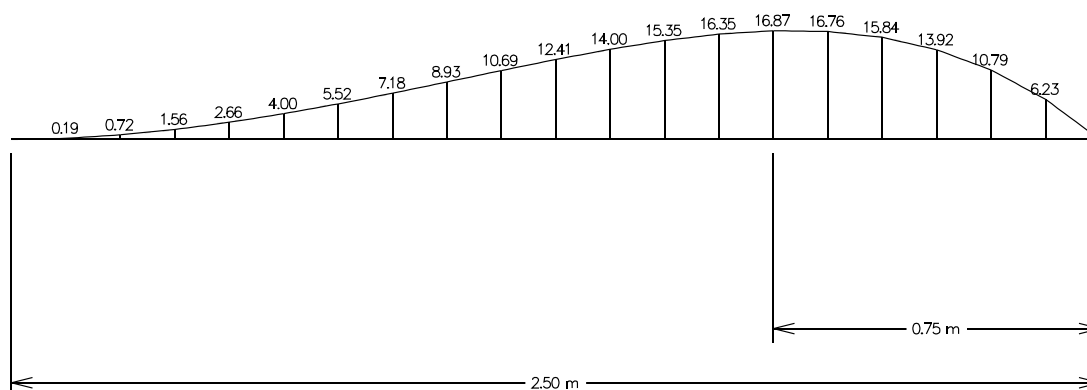
Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,363 \text{ mm}$

a.2) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$

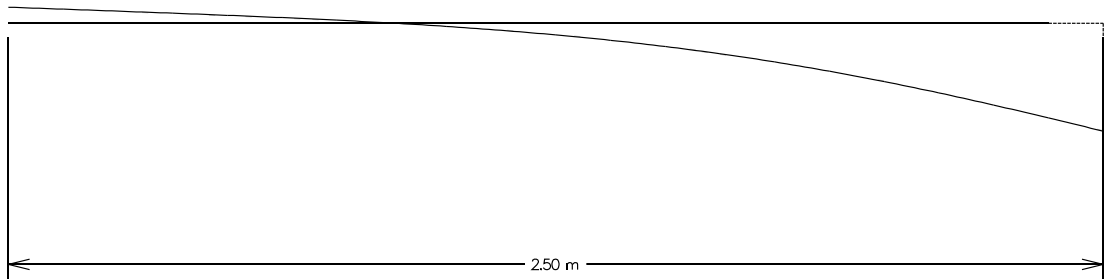
a.2.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$

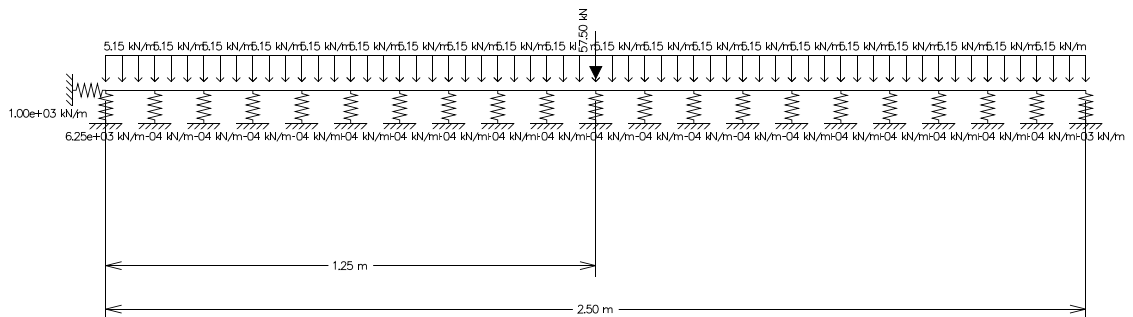


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 16,87 \text{ kNm}$

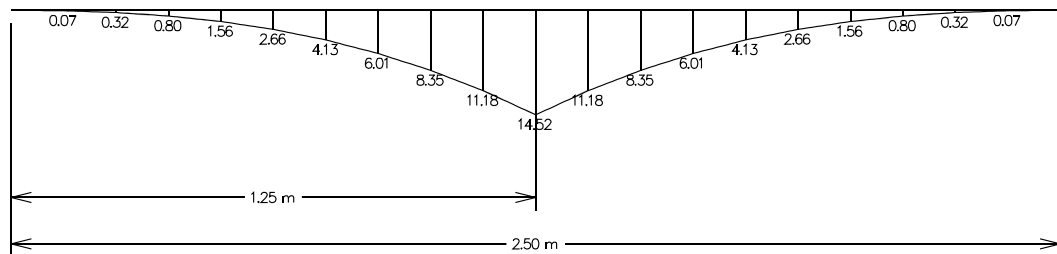


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,280 \text{ mm}$

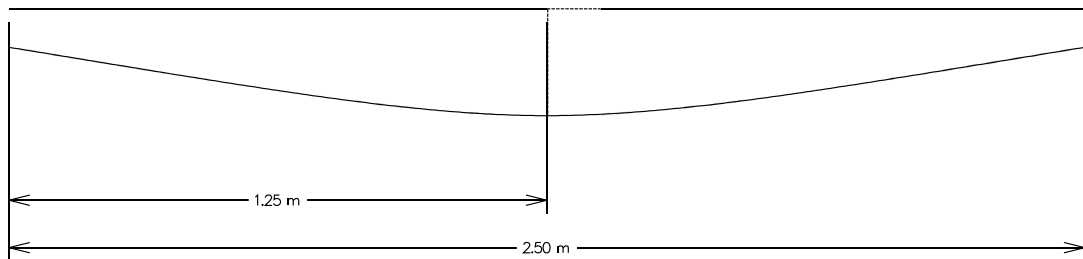
a.2.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 1: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$



Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 14,52 \text{ kNm}$

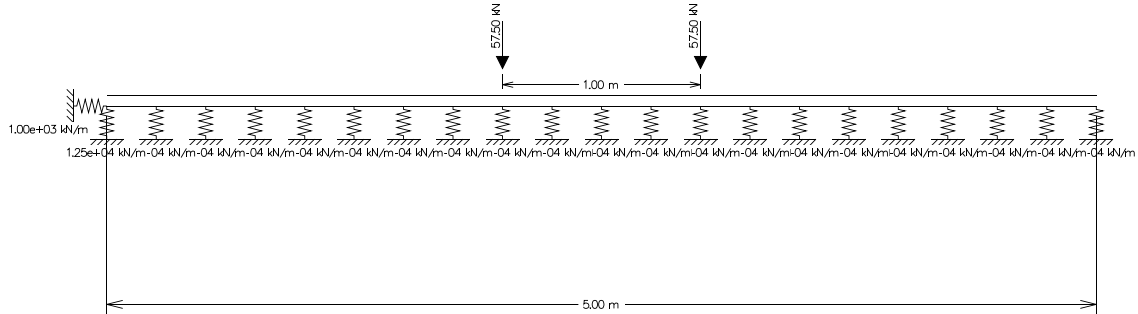


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,381 \text{ mm}$

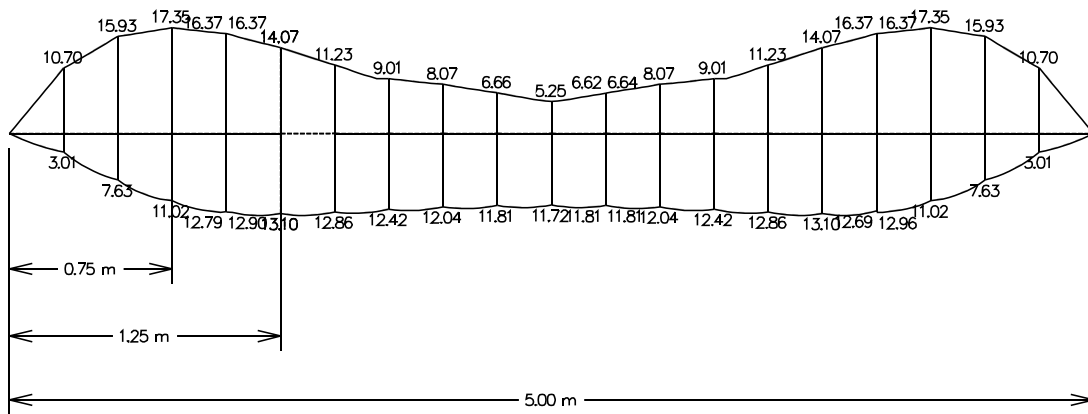
b) Carga móvel – Eixo (tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

b.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)



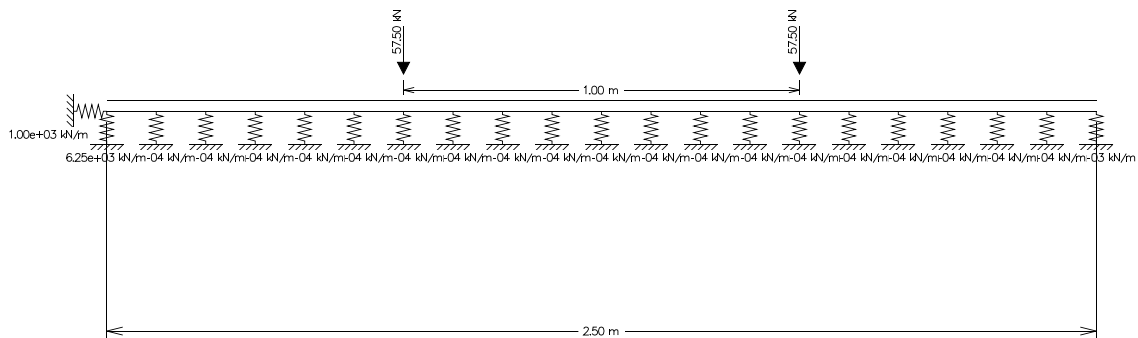
Carregamento – Combinação 3: $g_1 = 5,15$ kN/m + $p_1 = 2 \times 57,50$ kN



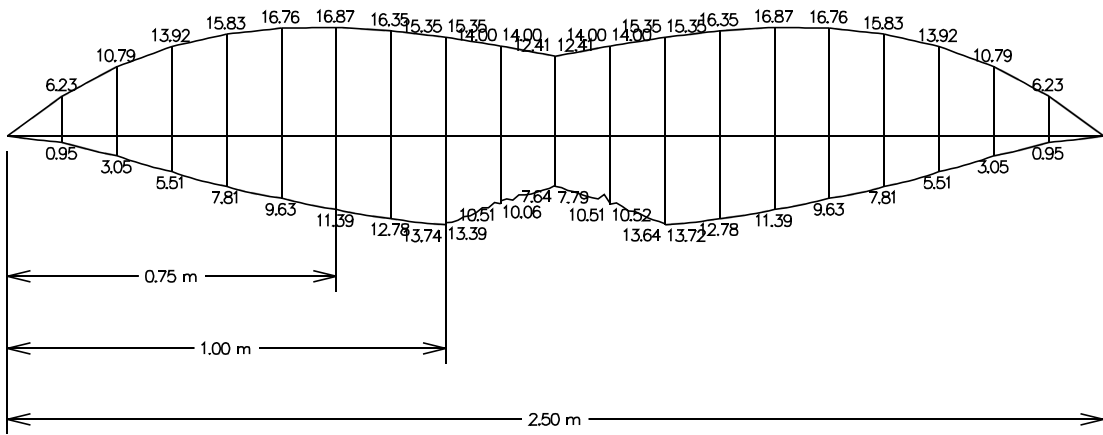
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 13,10$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 17,35$ kNm

b.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 3: $g_1 = 5,15$ kN/m + $p_1 = 2 \times 57,50$ kN



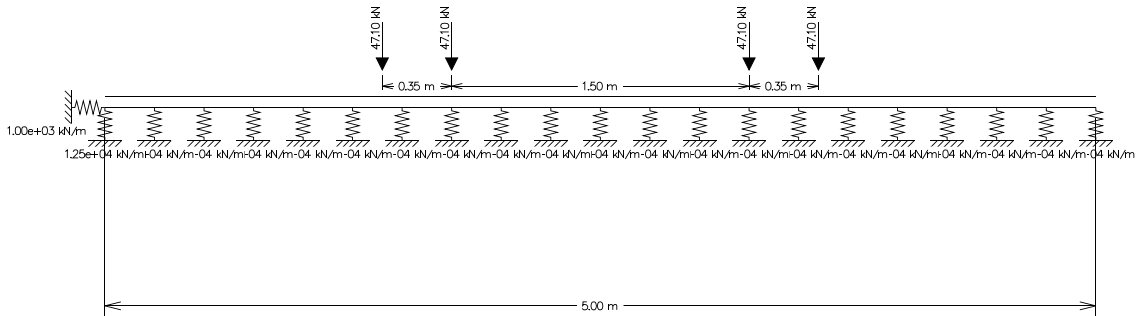
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 13,74 \text{ kNxm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 16,87 \text{ kNxm}$

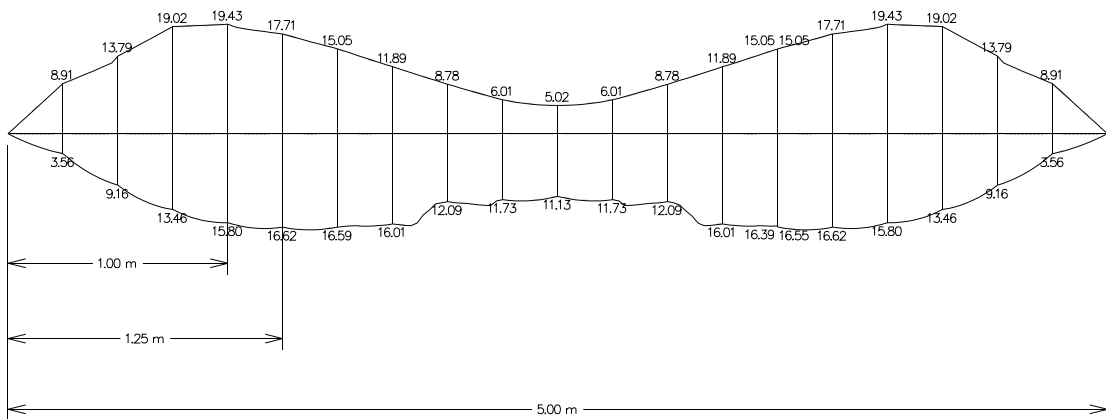
c) Carga móvel – Eixo (tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00 \text{ cm}$

c.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00 \text{ m}$)



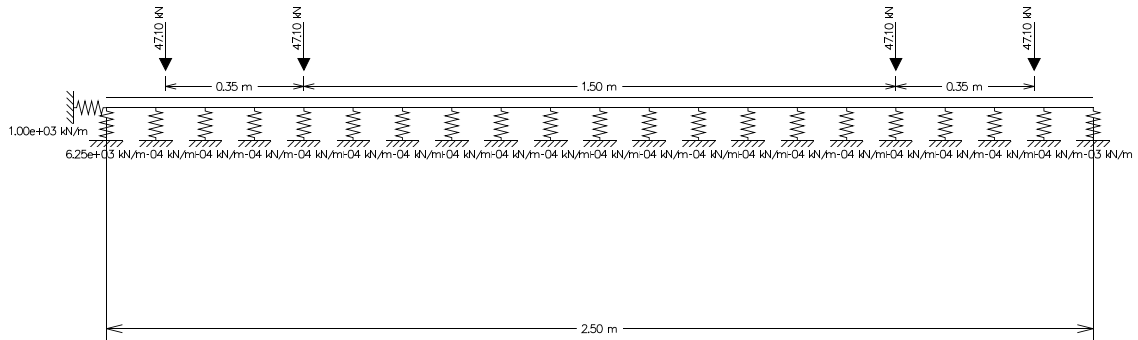
Carregamento – Combinação 4: $g_1 = 5,15 \text{ kN/m} + p_2 = 4 \times 47,10 \text{ kN}$



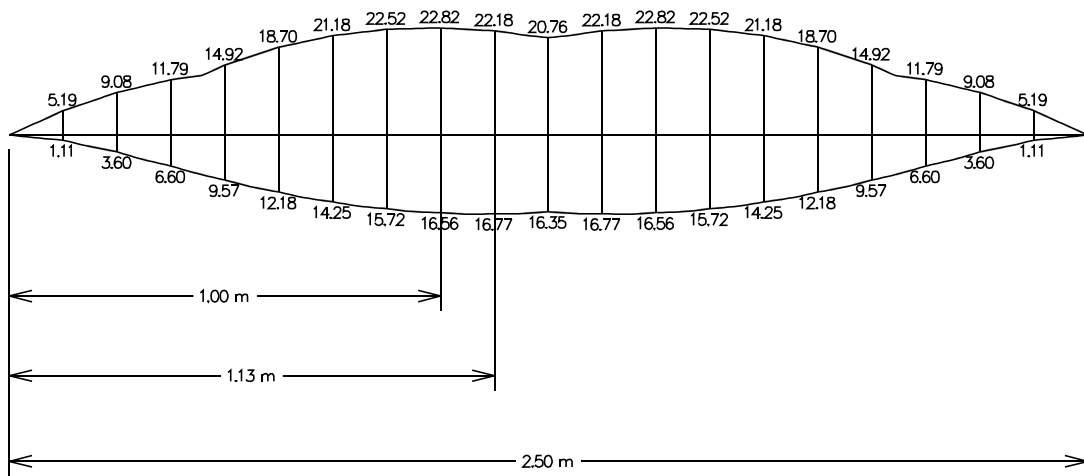
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 16,62 \text{ kNxm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 19,43 \text{ kNxm}$

c.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($I_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 4: $g_1 = 5,15$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN

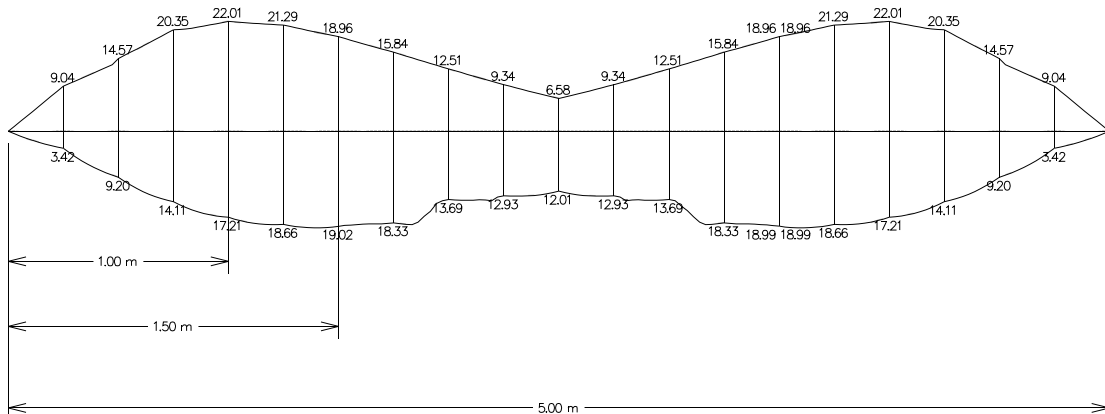


Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 16,77$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 22,82$ kNm

c.2) Espessura da placa de concreto simples – $h = 24,00$ cm

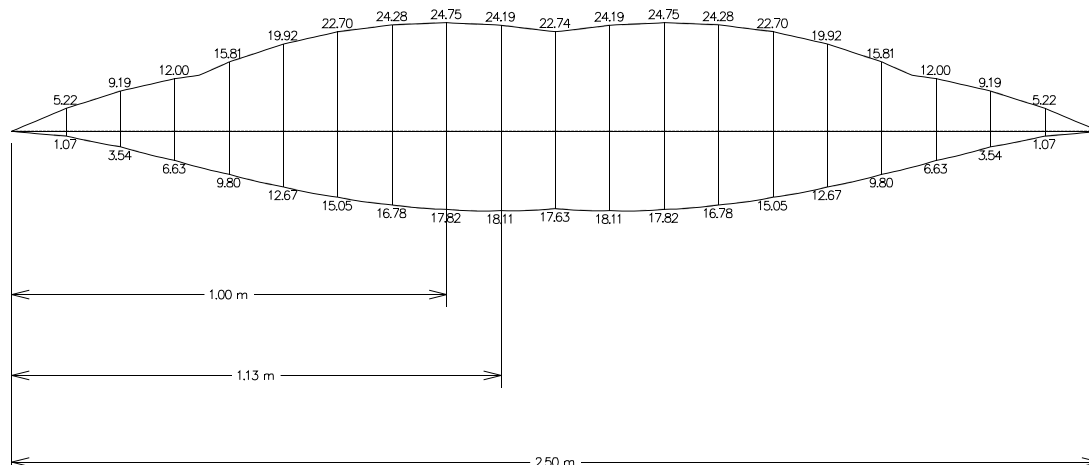
c.2.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($I_1 = 5,00$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 19,02$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 22,01$ kNm

c.2.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($I_2 = 2,50$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M_{m\acute{a}x}^+ = 18,11$ kNxm

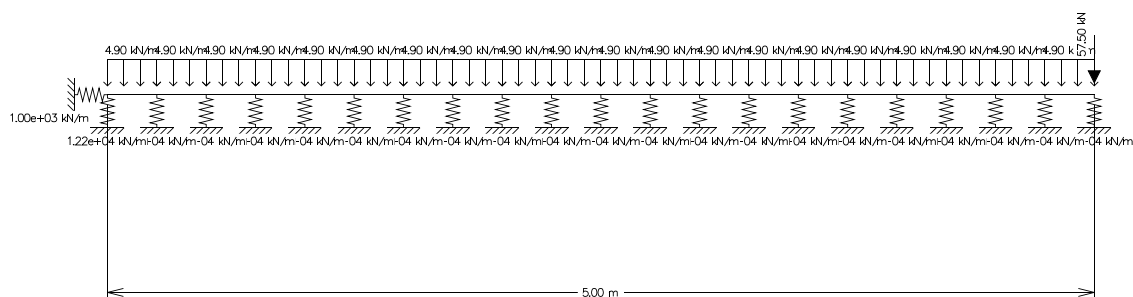
Momento fletor negativo máximo: $M_{m\acute{a}x}^- = 24,75$ kNxm

5.3.1.4 Modelo IV

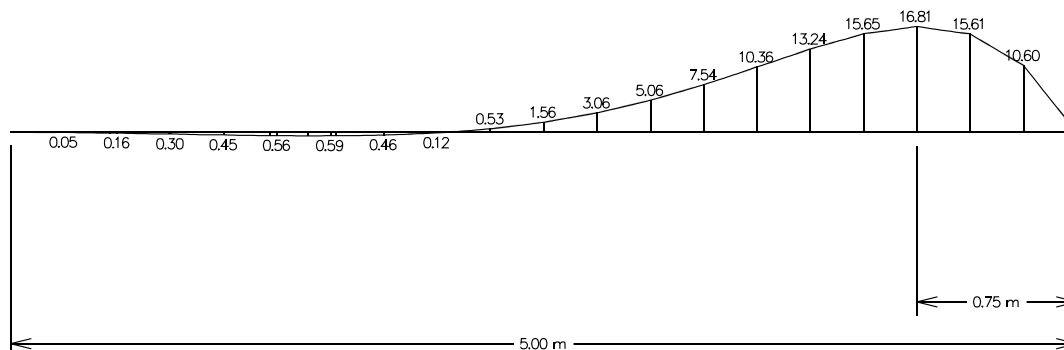
a) Carga estática – Semi-eixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

a.1) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga L ($I_1 = 5,00$ m)

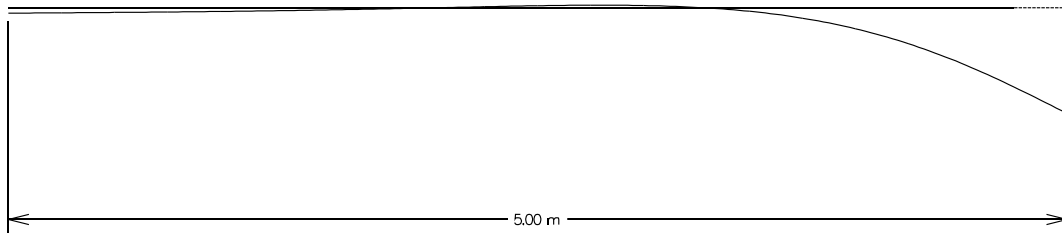
a.1.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90$ kN/m + $P_1 = 57,50$ kN

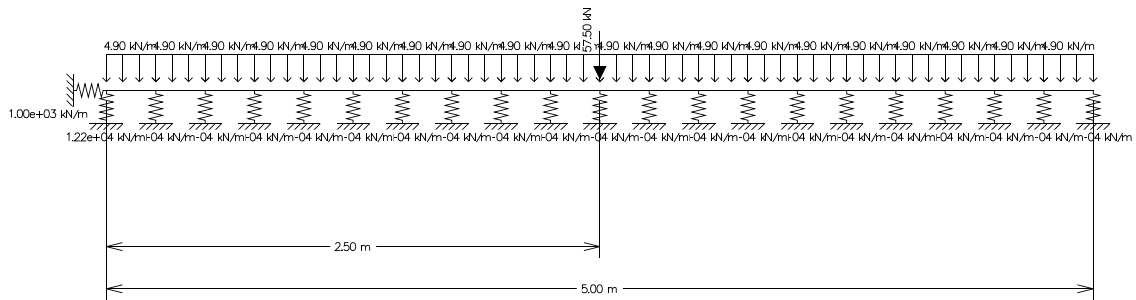


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x}^- = 16,81$ kNxm

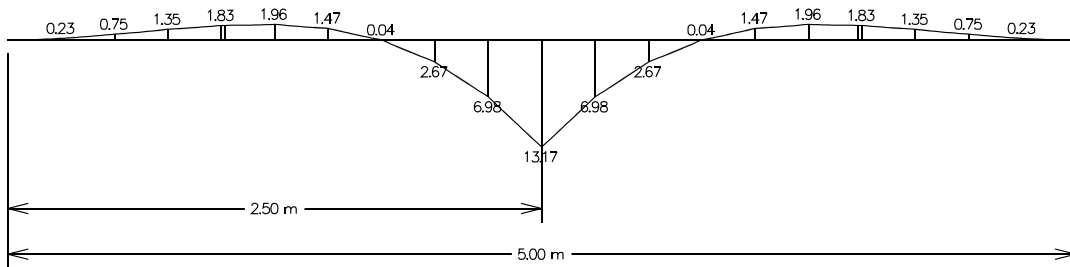


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,290 \text{ mm}$

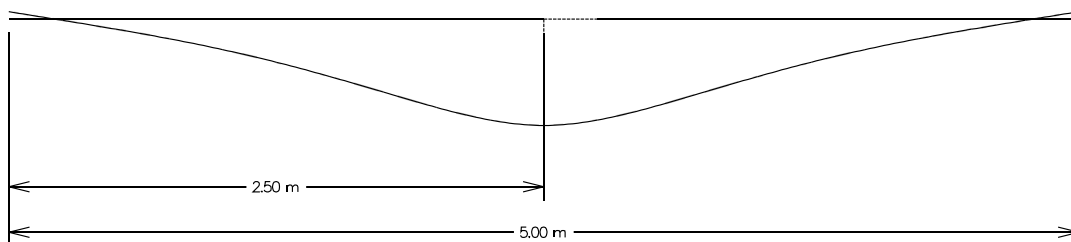
a.1.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$



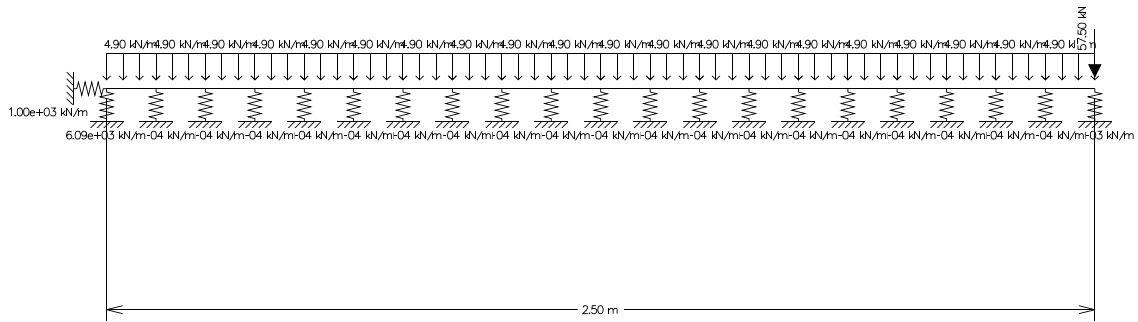
Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 13,17 \text{ kNm}$



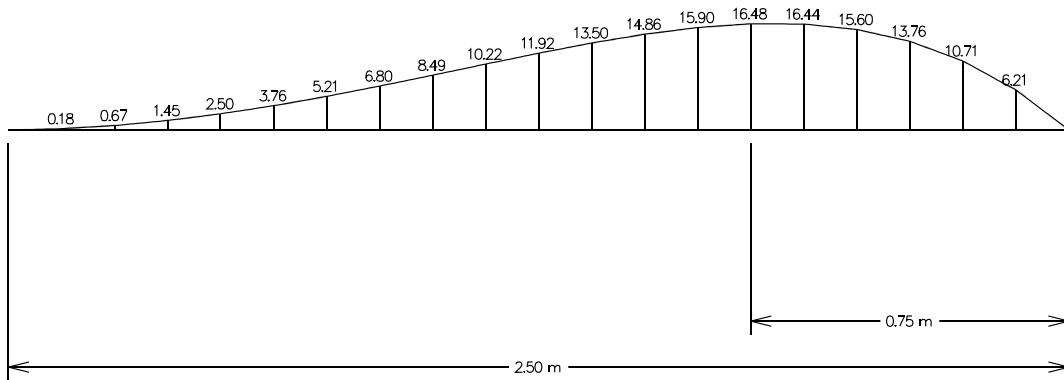
Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,378 \text{ mm}$

a.2) Diagrama de momento fletor ($M_{m\acute{a}x}$) e Linha elástica ($\omega_{m\acute{a}x}$) – Viga $W (I_2 = 2,50 \text{ m})$

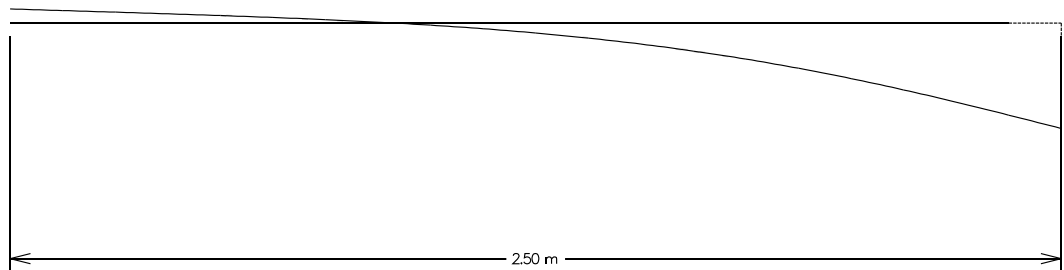
a.2.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$

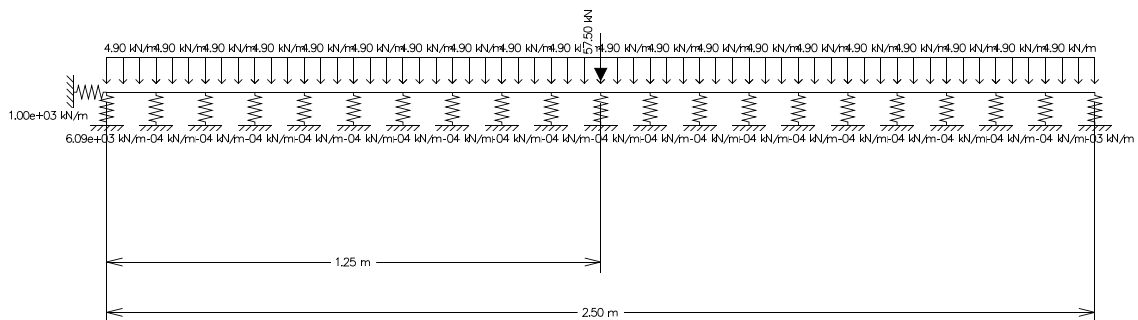


Momento fletor negativo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 16,48 \text{ kNm}$

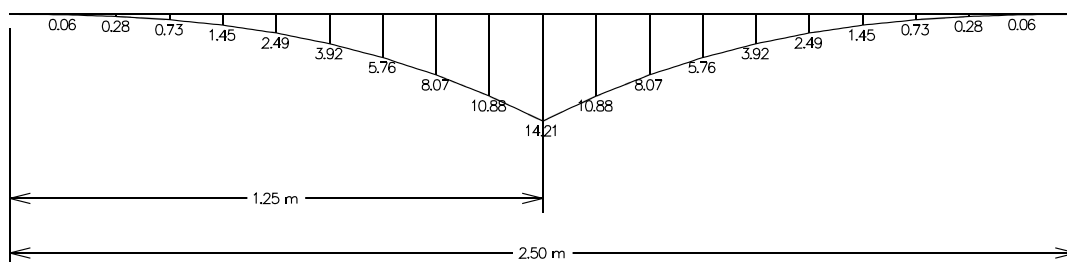


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,340 \text{ mm}$

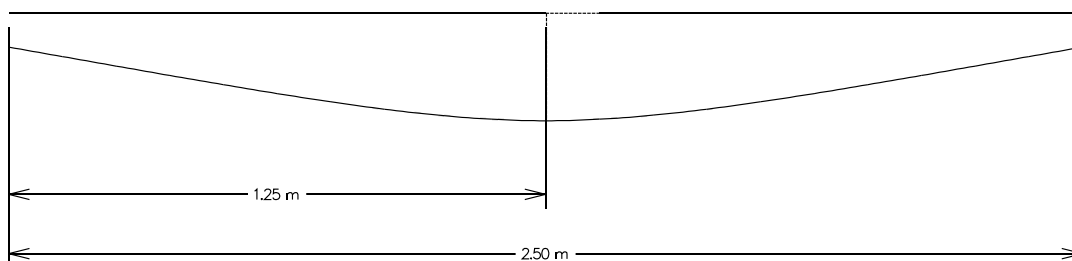
a.2.2) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



Carregamento - Combinação 2: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + P_1 = 57,50 \text{ kN}$



Momento fletor positivo máximo – $M_{m\acute{a}x} = 14,21 \text{ kNm}$

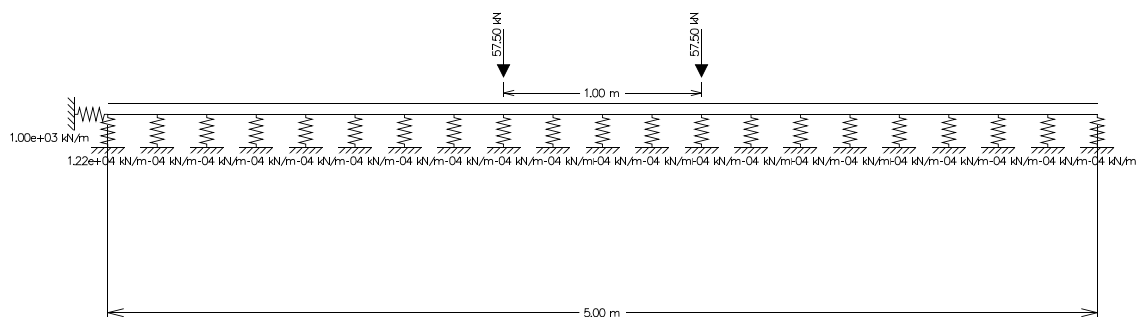


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,398 \text{ mm}$

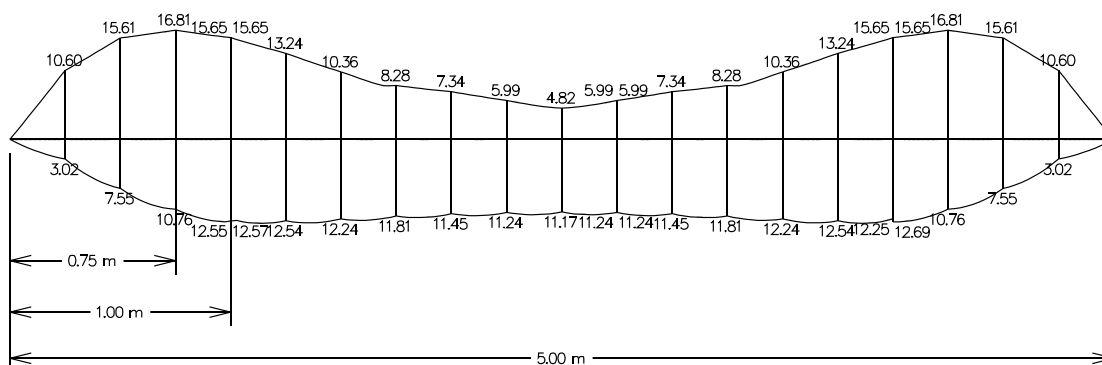
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00 \text{ cm}$

b.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00 \text{ m}$)



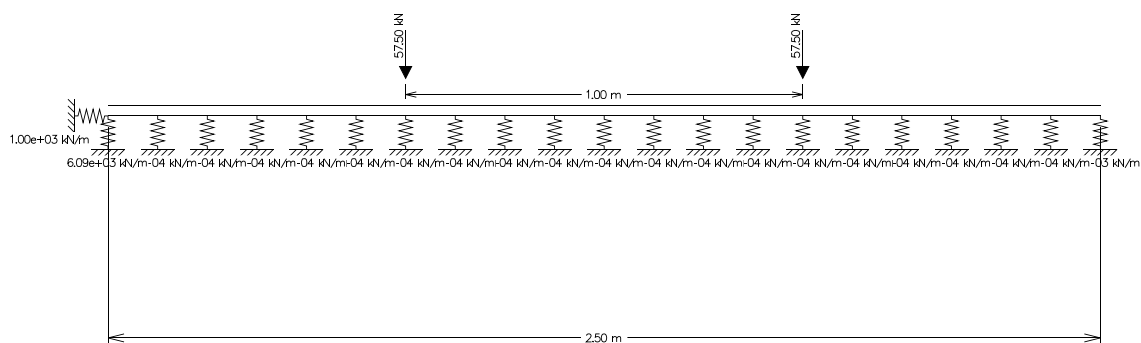
Carregamento - Combinação 5: $g_2 = 4,90 \text{ kN/m} + p_1 = 2 \times 57,50 \text{ kN}$



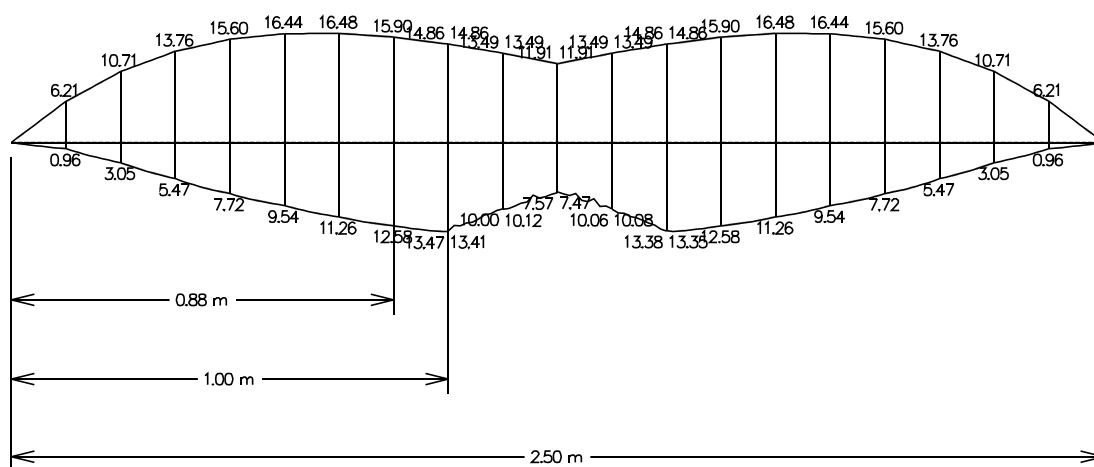
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 12,55 \text{ kNm}$

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 16,81 \text{ kNm}$

b.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 5: $g_2 = 4,90$ kN/m + $p_1 = 2 \times 57,50$ kN



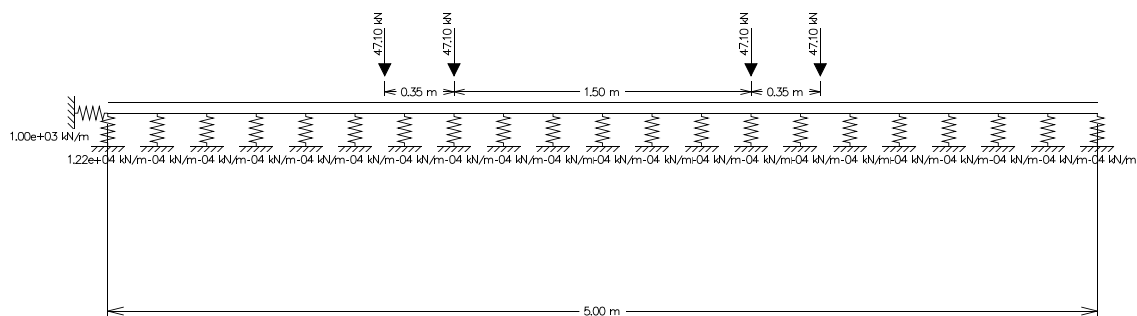
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 13,47$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 15,90$ kNm

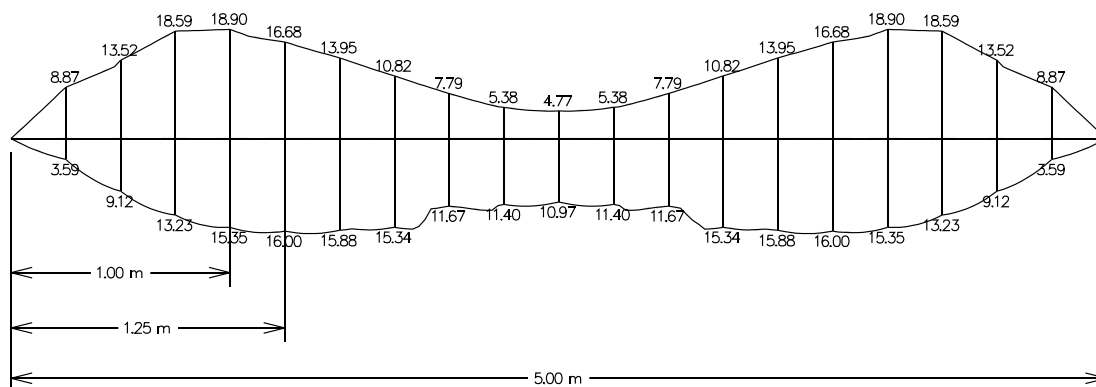
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

c.1.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)



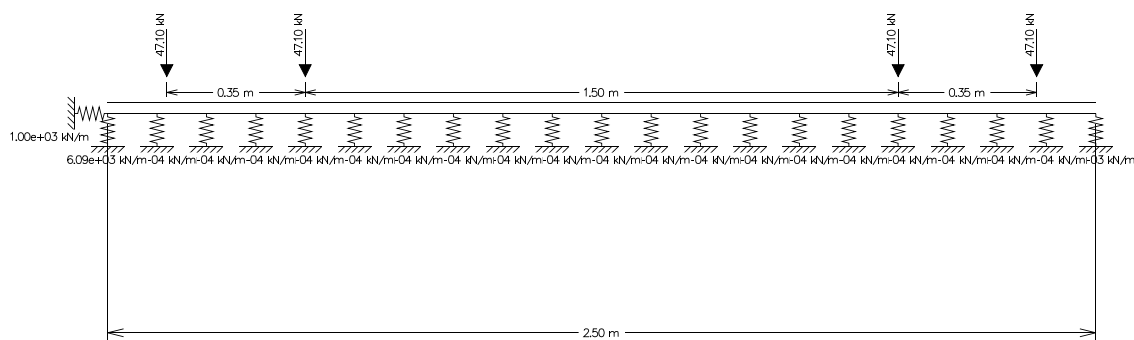
Carregamento - Combinação 6: $g_2 = 5,15$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN



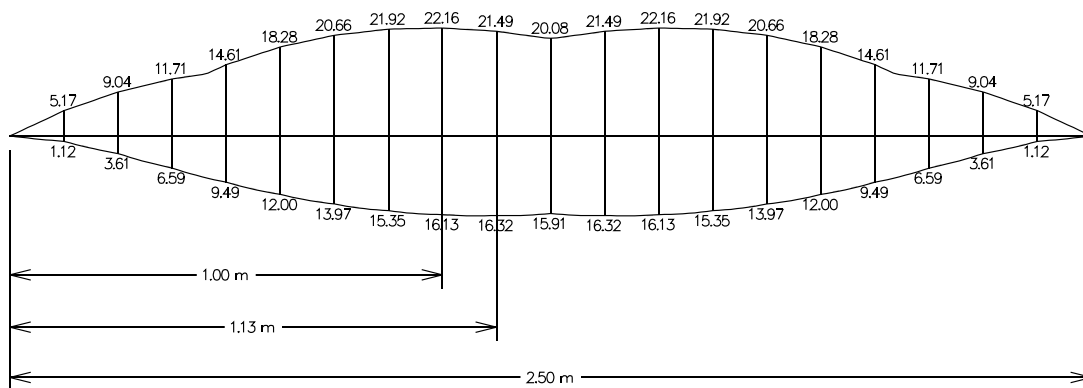
Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 16,00$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 18,90$ kNm

c.1.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($I_2 = 2,50$ m)



Carregamento - Combinação 6: $g_2 = 5,15$ kN/m + $p_2 = 4 \times 47,10$ kN

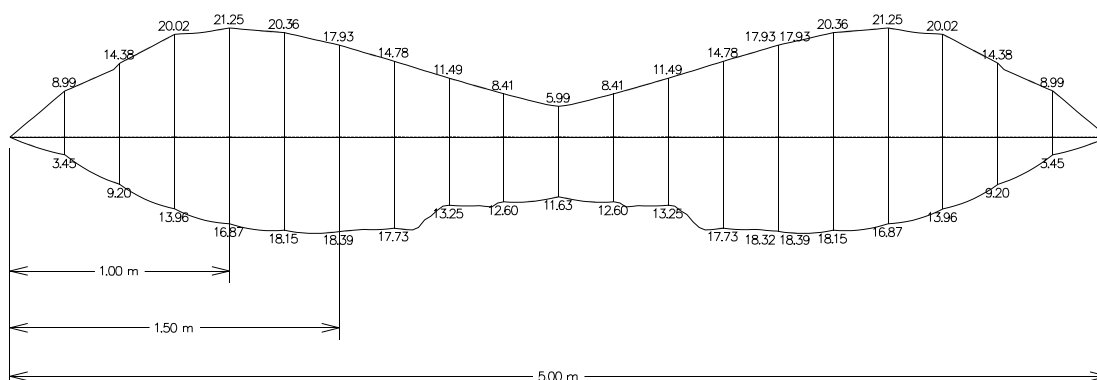


Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 16,32$ kNm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 22,16$ kNm

c.2) Espessura da placa de concreto simples – $h = 23,00$ cm

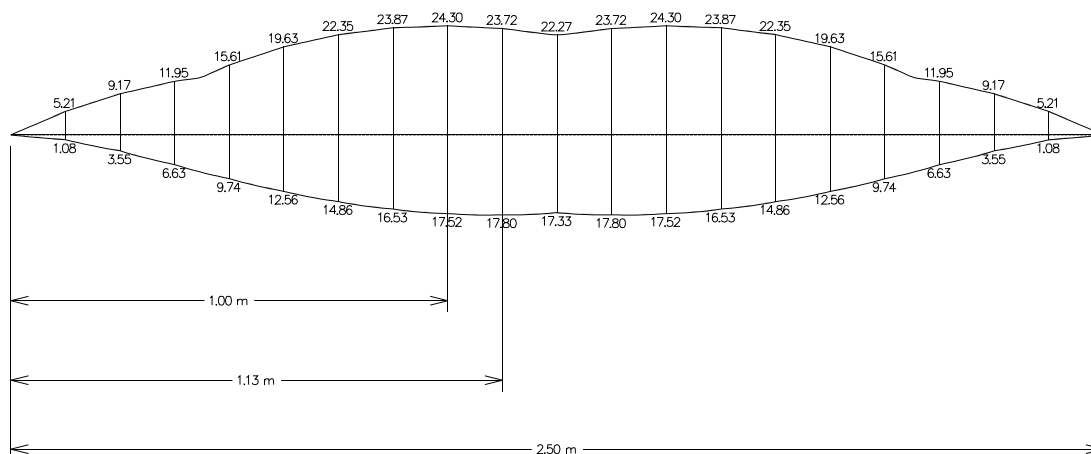
c.2.1) Envoltória de momento fletor (M) – Viga L ($l_1 = 5,00$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 18,39$ kNxm

Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 21,25$ kNxm

c.2.2) Envoltória de momento fletor (M) – Viga W ($l_2 = 2,50$ m)



Momento fletor positivo máximo: $M^+_{m\acute{a}x} = 17,80$ kNxm

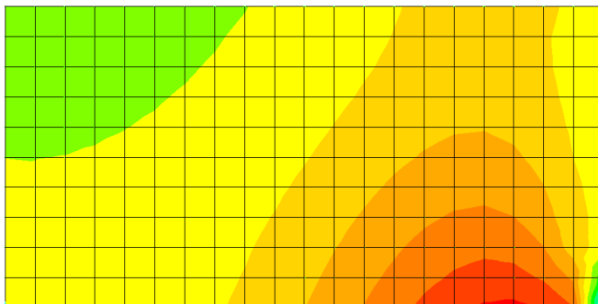
Momento fletor negativo máximo: $M^-_{m\acute{a}x} = 24,30$ kNxm

5.3.2 Modelos bidimensionais – SAP 2.000 versão 14.2

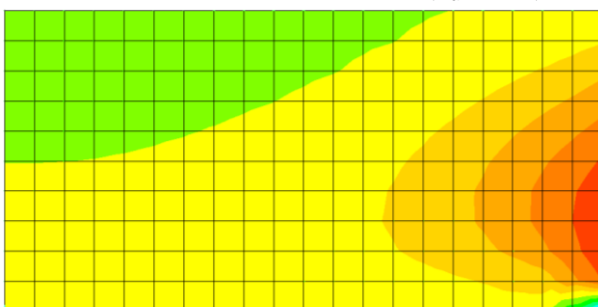
5.3.2.1 Modelo I

a) Carga estática - Semieixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

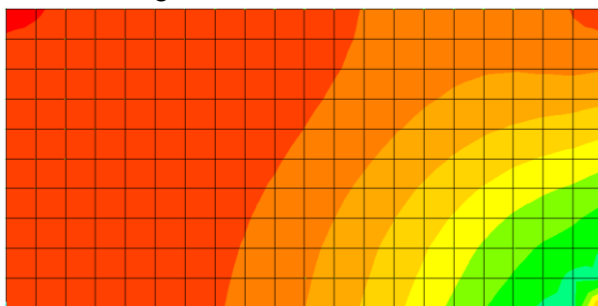
a.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



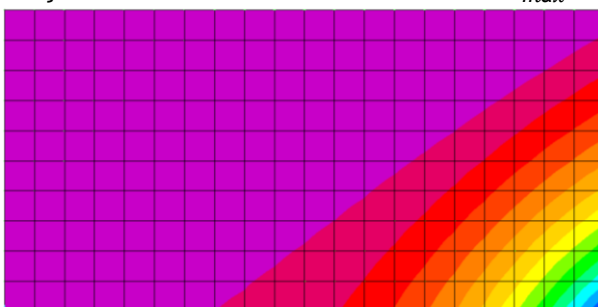
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 18,30 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 17,40 \text{ kNxm/m}$

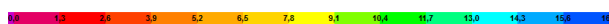
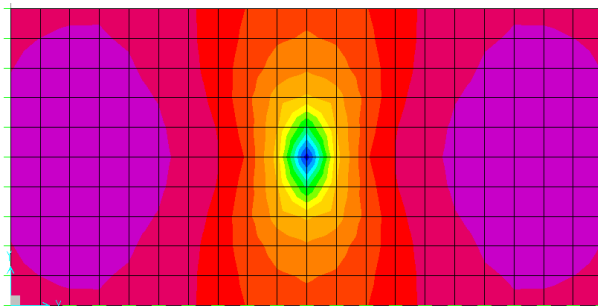


Tensão de tração na flexão transversal máxima - $\sigma_{máx} = 3,980 \text{ MPa}$

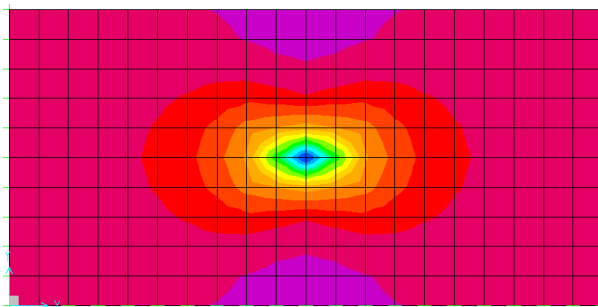


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 2,600 \text{ mm}$

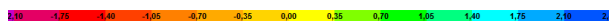
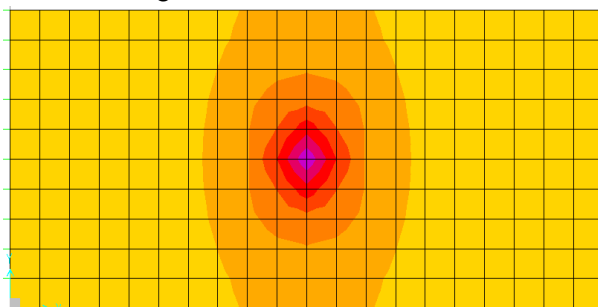
a.2) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (Carga concentrada)



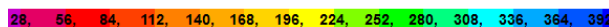
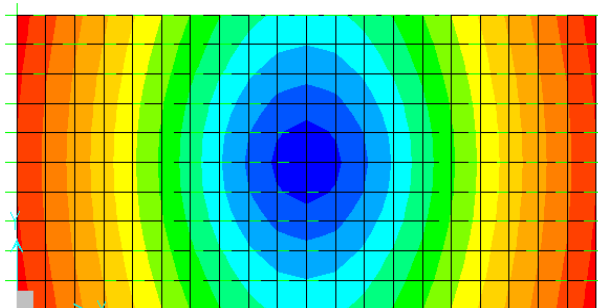
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 17,60$ kNxm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 16,00$ kNxm/m

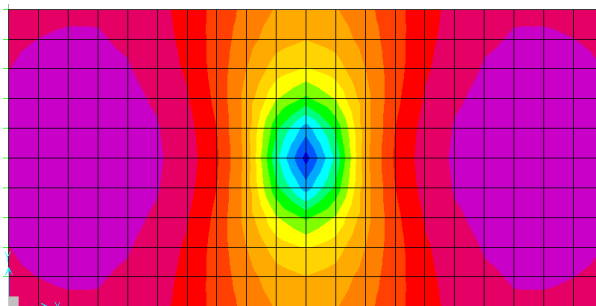


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 1,630$ MPa

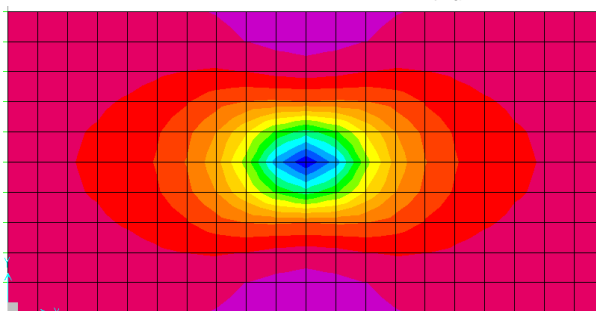


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,400$ mm

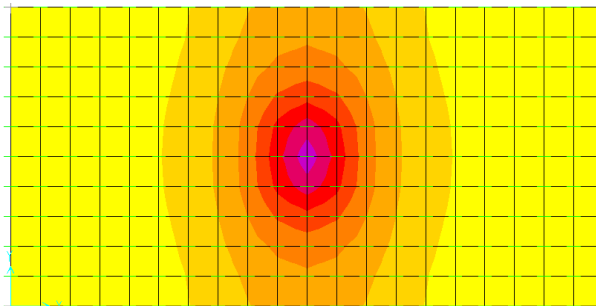
a.3) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu com a placa)



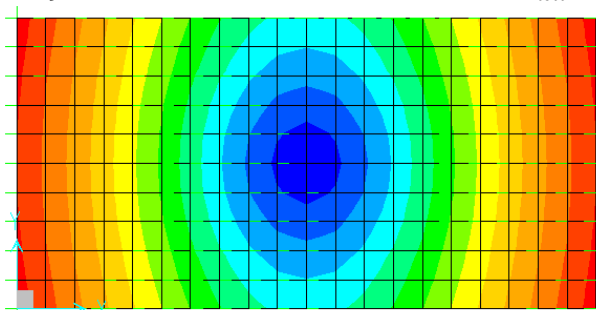
Momento fletor transversal máximo – $M_{t\max} = 10,70 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{l\max} = 9,00 \text{ kNm/m}$



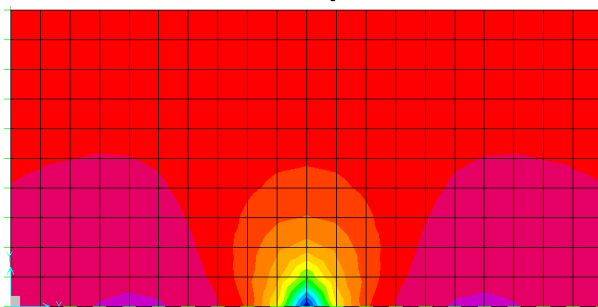
Tensão de tração na flexão transversal máxima - $\sigma_{\max} = 1,220 \text{ MPa}$



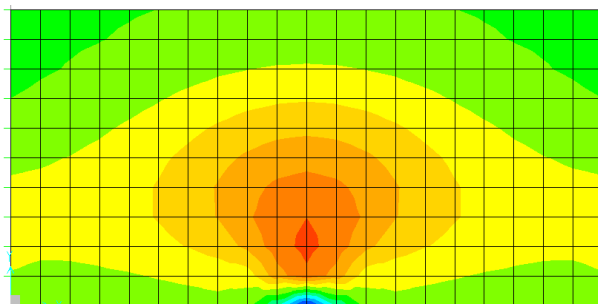
28, 56, 84, 112, 140, 168, 196, 224, 252, 280, 308, 336, 364, 392

Deflexão máxima – $\omega_{\max} = 0,400 \text{ mm}$

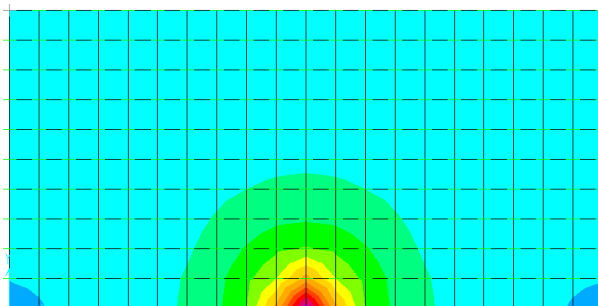
a.4) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



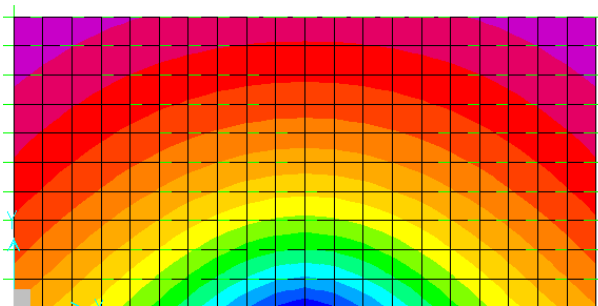
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 19,30 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 4,15 \text{ kNxm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 1,680 \text{ MPa}$

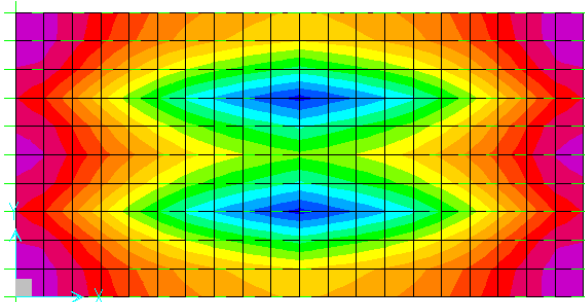


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,600 \text{ mm}$

b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

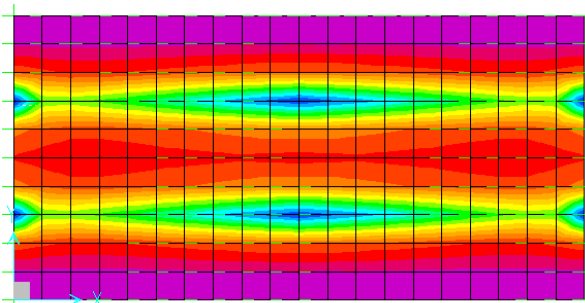
b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

b.1.1) Direção longitudinal



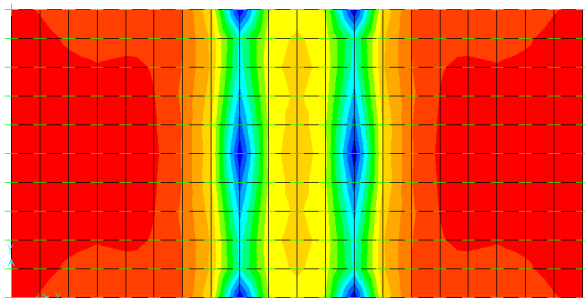
1,5 3,0 4,5 6,0 7,5 9,0 10,5 12,0 13,5 15,0 16,5 18,0 19,5 21,5

Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 21,50$ kNm/m



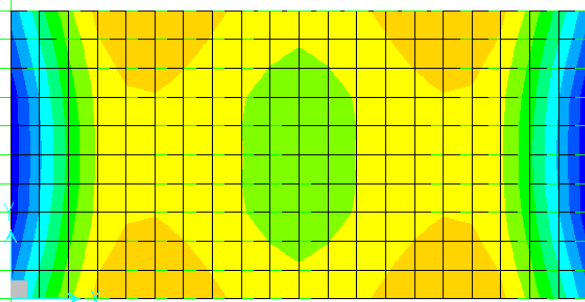
1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0 11,0 12,0 13,0 14,0

Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 17,60$ kNm/m



0,19 0,38 0,57 0,76 0,95 1,14 1,33 1,52 1,71 1,90 2,09 2,28

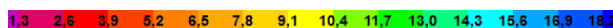
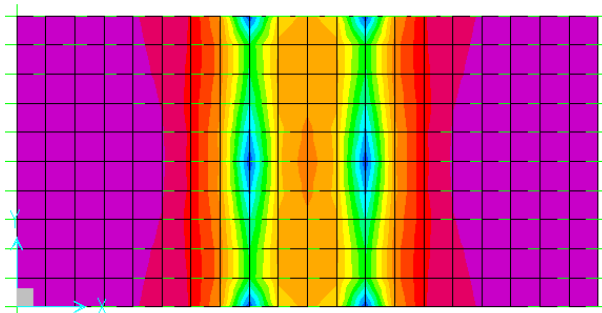
Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,923$ MPa



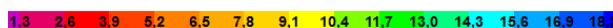
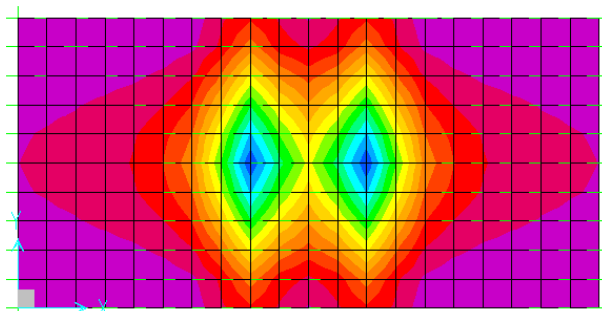
0,08 0,15 0,23 0,30 0,38 0,45 0,53 0,60 0,68 0,75 0,83 0,90 0,98 1,0

Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 1,100$ mm

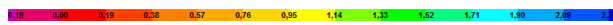
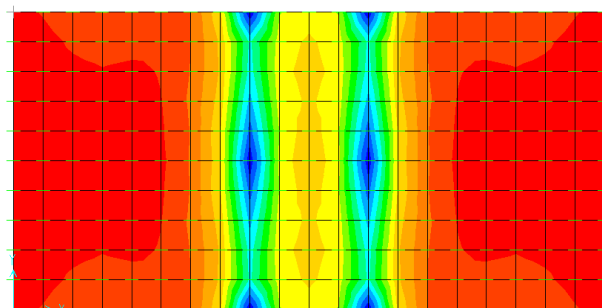
b.1.2) Direção transversal



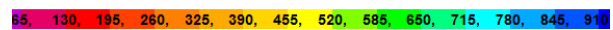
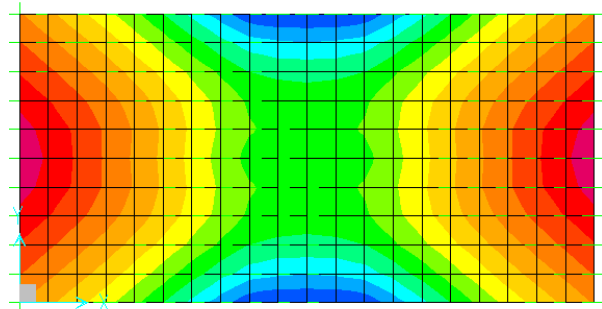
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 17,60 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 18,00 \text{ kNxm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,393 \text{ MPa}$

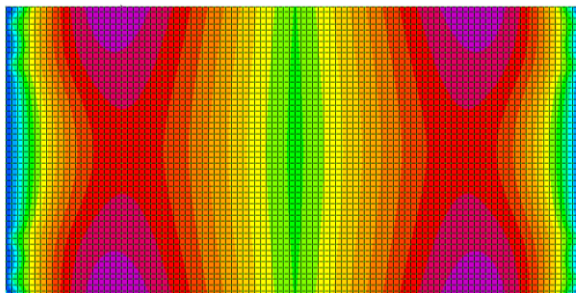


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,900 \text{ mm}$

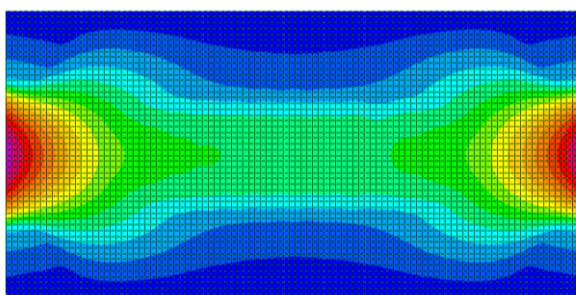
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

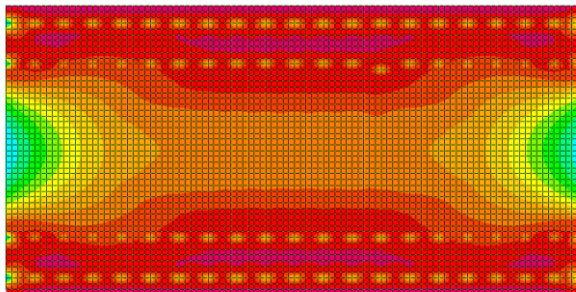
c.1.1) Direção longitudinal



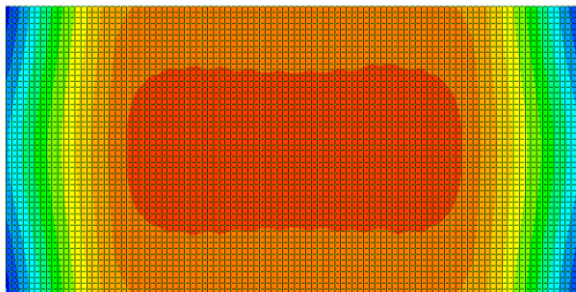
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 33,10$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 28,30$ kNm/m



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 3,847$ MPa

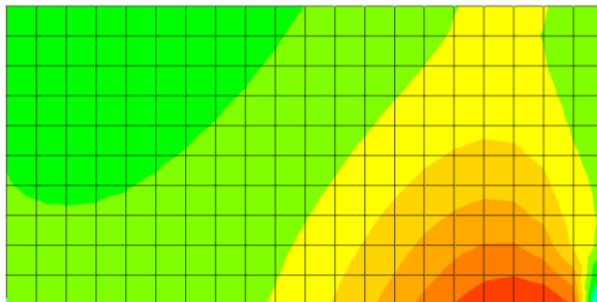
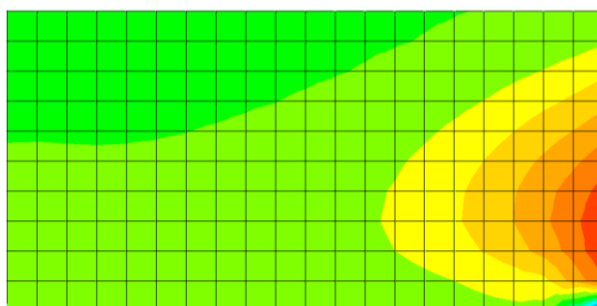
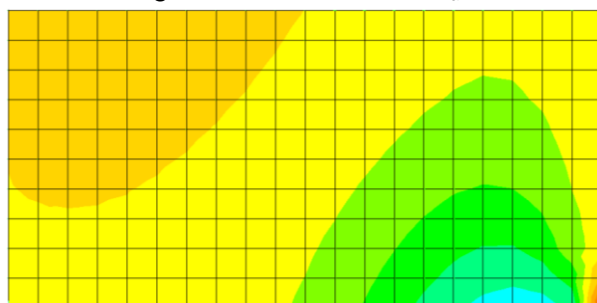
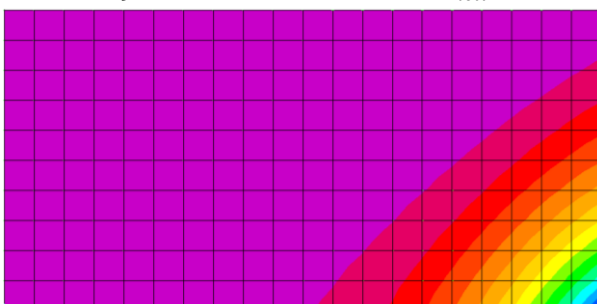


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 3,400$ mm

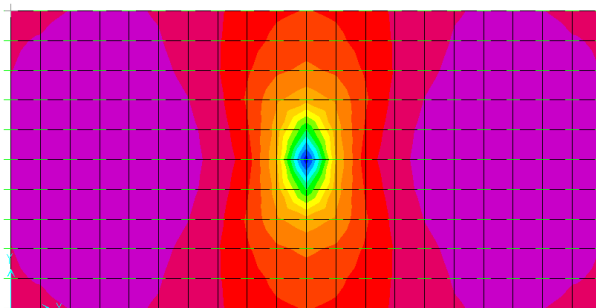
5.3.2.2 Modelo II

a) Carga estática - Semieixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

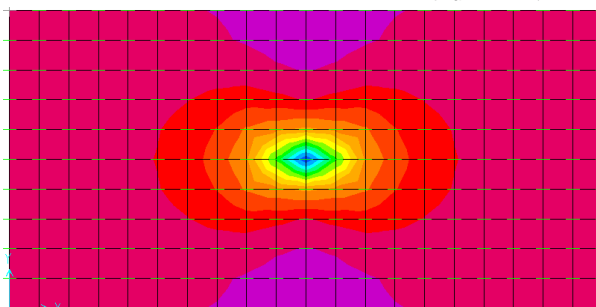
a.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa

Momento fletor transversal máximo – $M_{m\acute{a}x} = 18,20$ kNxm/mMomento fletor longitudinal máximo – $M_{m\acute{a}x} = 17,70$ kNxm/mTensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,747$ MPaDeflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 2,200$ mm

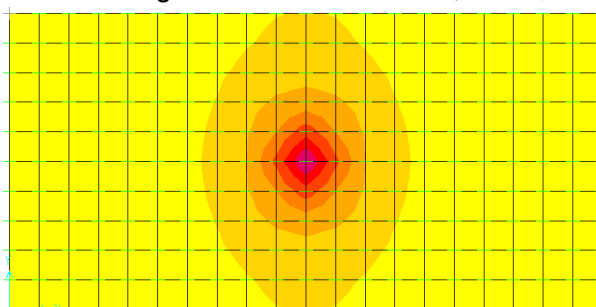
a.2) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga concentrada)



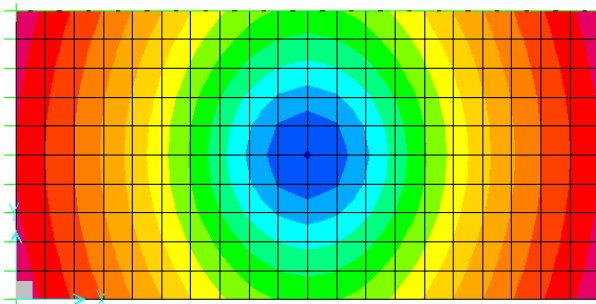
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 16,40 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 15,60 \text{ kNxm/m}$

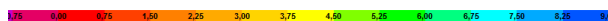
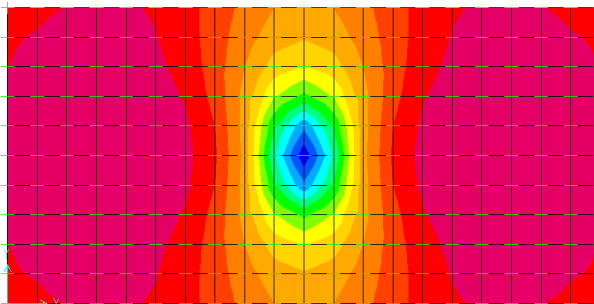


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 1,692 \text{ MPa}$

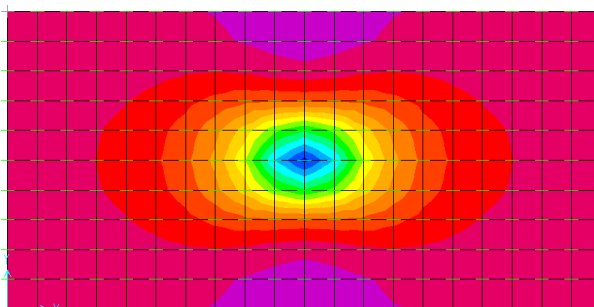


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,300 \text{ mm}$

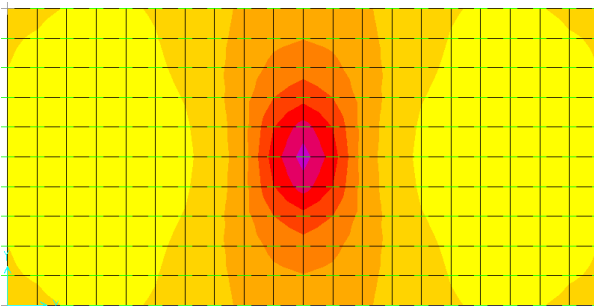
a.3) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu com a placa)



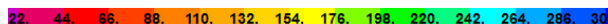
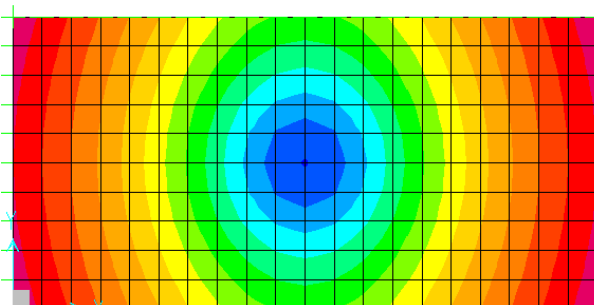
Momento fletor transversal máximo – $M_{t\max} = 9,60 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{l\max} = 8,70 \text{ kNxm/m}$

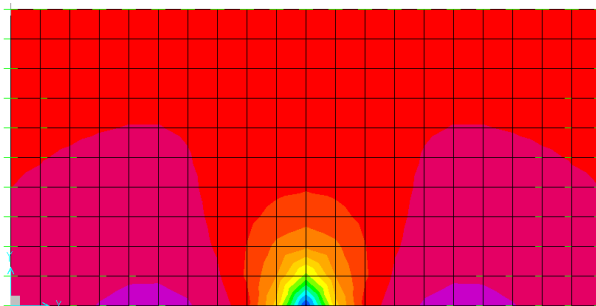


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{\max} = 1,433 \text{ MPa}$

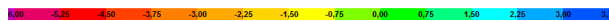
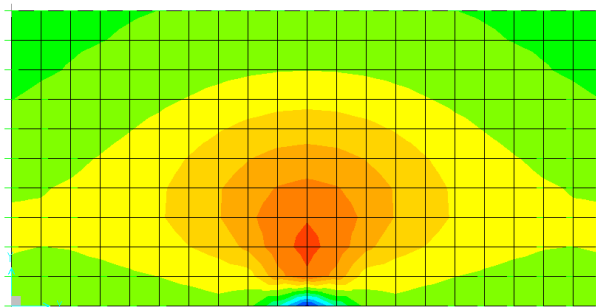


Deflexão máxima – $\omega_{\max} = 0,300 \text{ mm}$

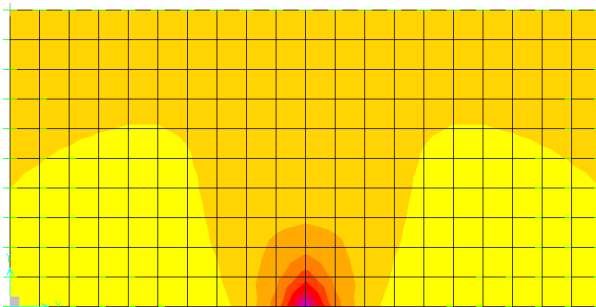
a.4) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



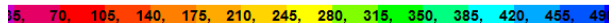
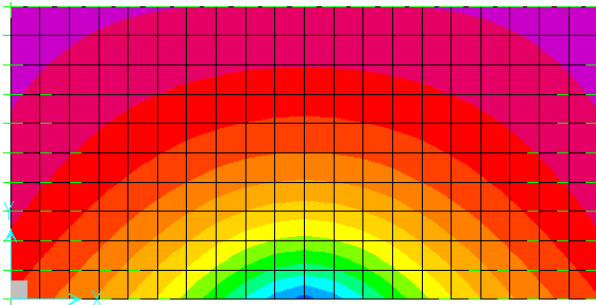
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 18,30 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 4,04 \text{ kNm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 1,582 \text{ MPa}$

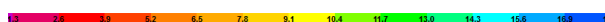
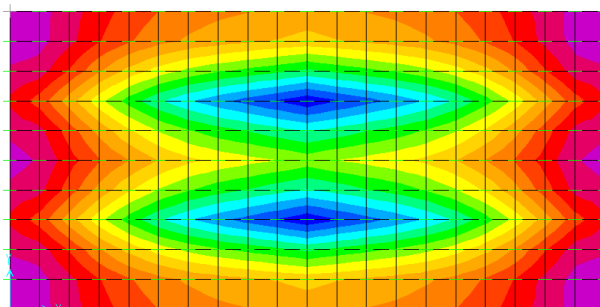


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,500 \text{ mm}$

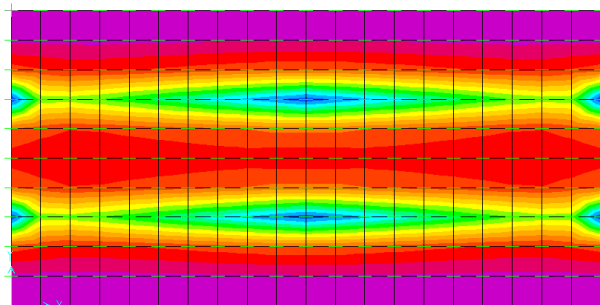
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

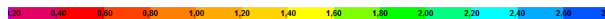
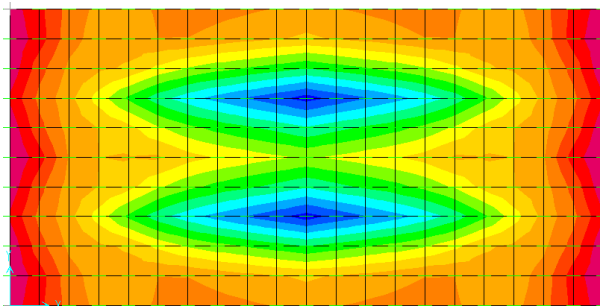
b.1.1) Direção longitudinal



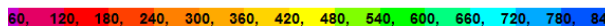
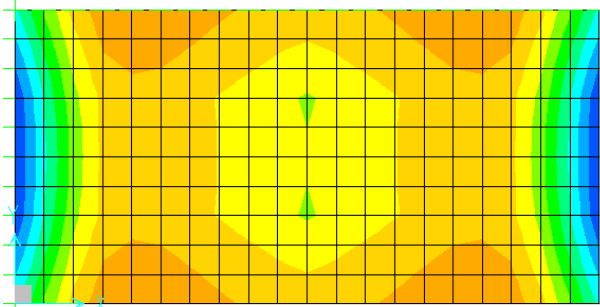
Momento fletor transversal máximo – $M_{t\max} = 19,20$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{l\max} = 14,00$ kNm/m

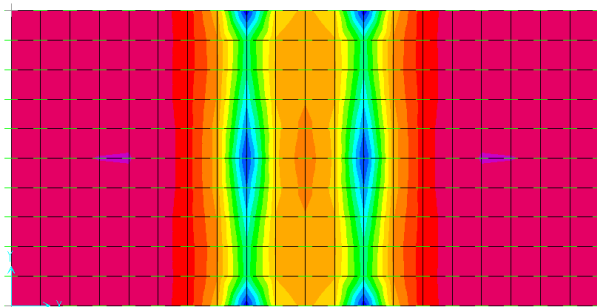


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\max} = 2,876$ MPa

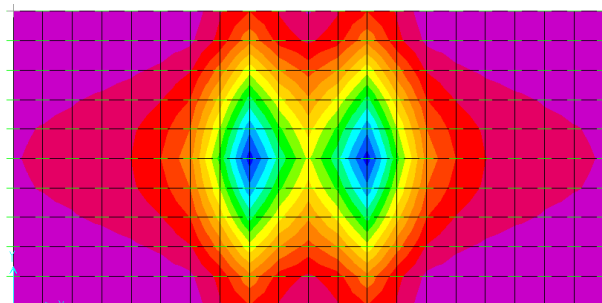


Deflexão máxima – $\omega_{m\max} = 0,800$ mm

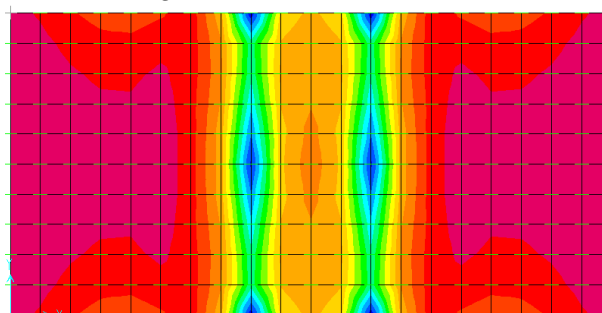
b.1.2) Direção transversal



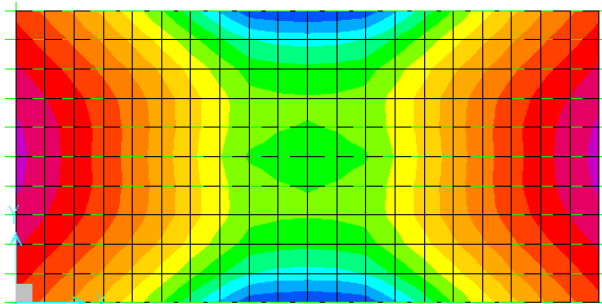
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 16,50 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 17,40 \text{ kNm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,375 \text{ MPa}$

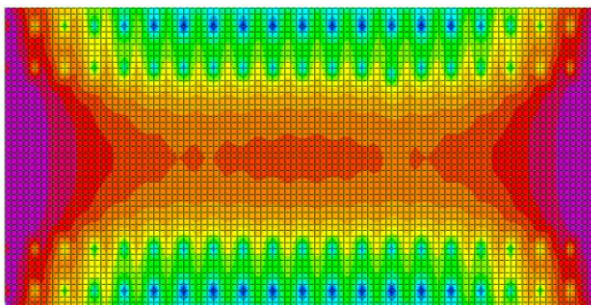


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,700 \text{ mm}$

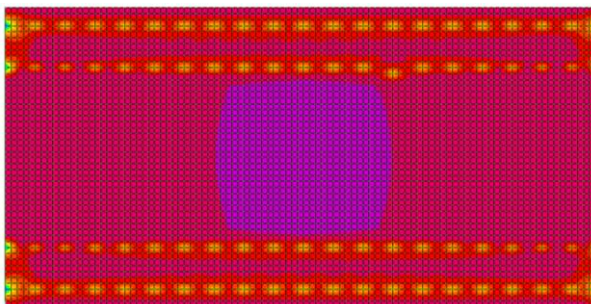
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

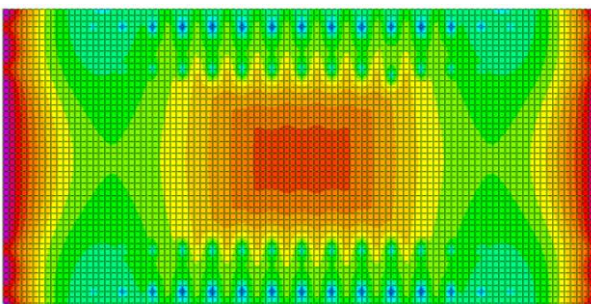
c.1.1) Direção longitudinal



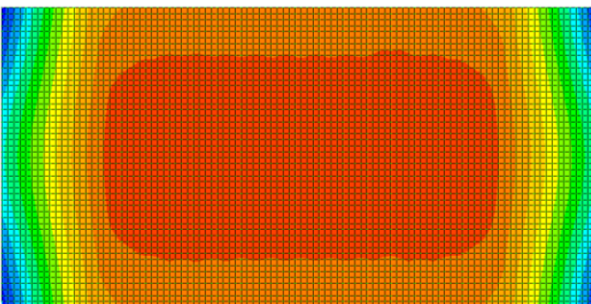
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 37,00$ kNm/m



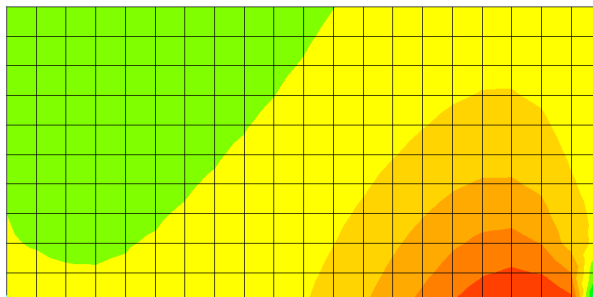
Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 33,60$ kNm/m



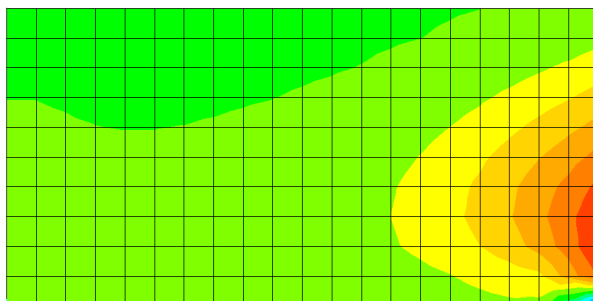
Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 4,336$ MPa



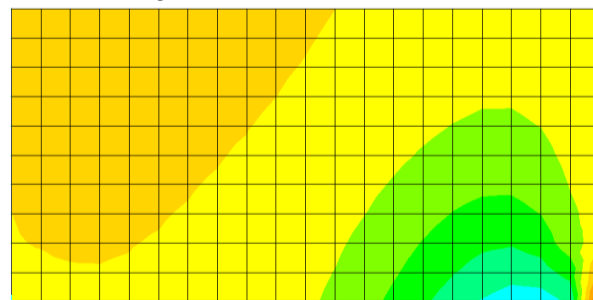
Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 2,700$ mm

5.3.2.3 Modelo III**a) Carga estática - Semieixo (Modelos Analíticos de Westergaard)****a.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa**

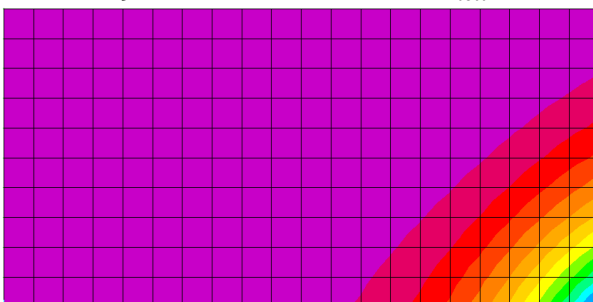
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 17,85 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 18,00 \text{ kNxm/m}$

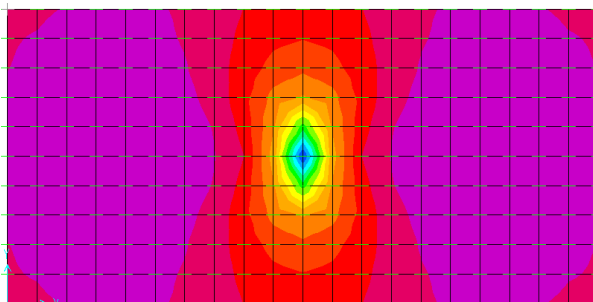


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,483 \text{ MPa}$

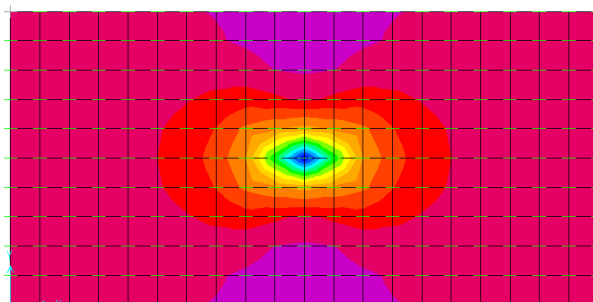


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 1,500 \text{ mm}$

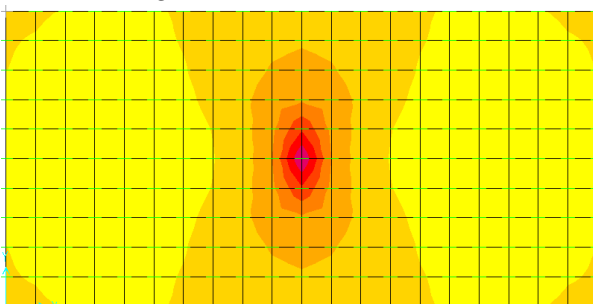
a.2) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga concentrada)



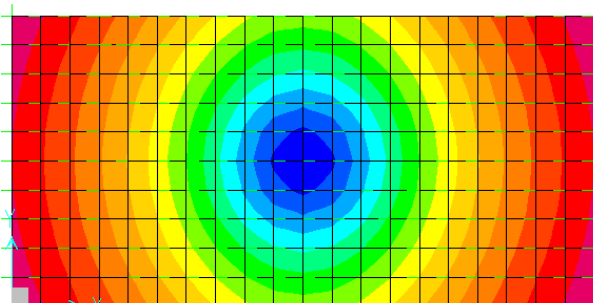
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 15,80 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 15,30 \text{ kNxm/m}$

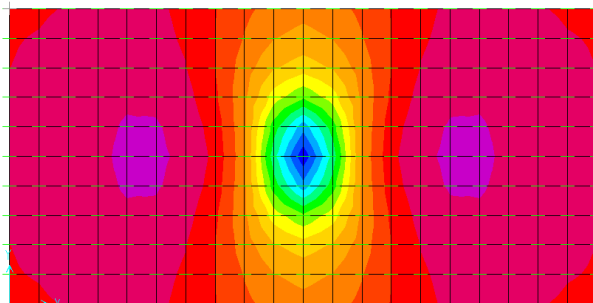


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,143 \text{ MPa}$

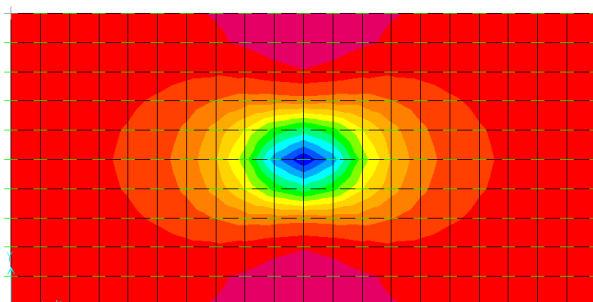


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,200 \text{ mm}$

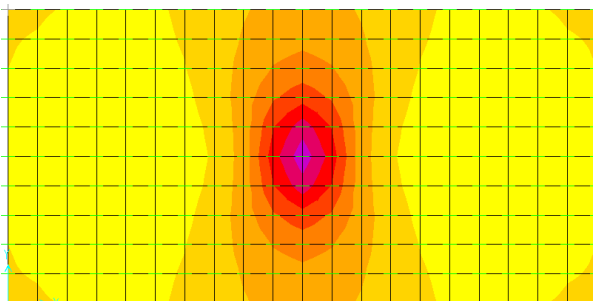
a.3) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu com a placa)



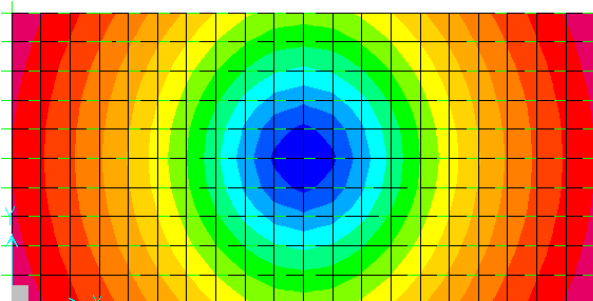
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmax} = 8,90 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmax} = 8,40 \text{ kNxm/m}$

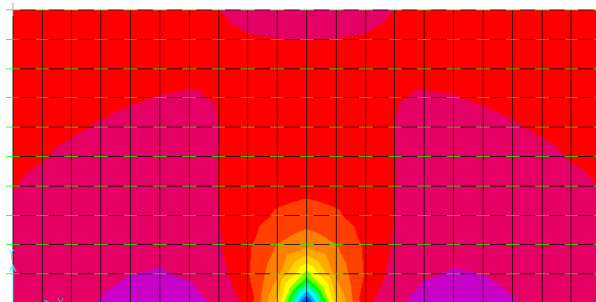


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{max} = 1,210 \text{ MPa}$

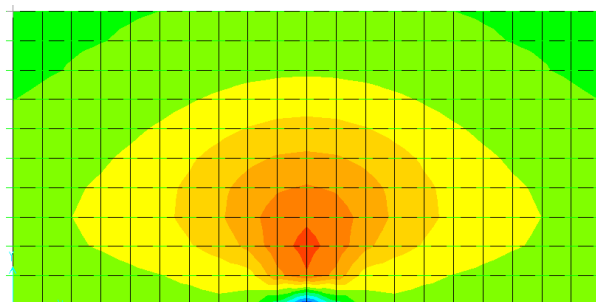


Deflexão máxima – $\omega_{max} = 0,200 \text{ mm}$

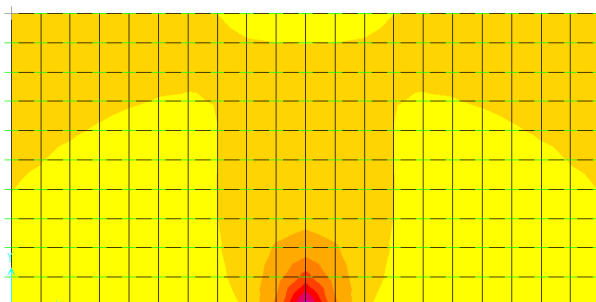
a.3) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



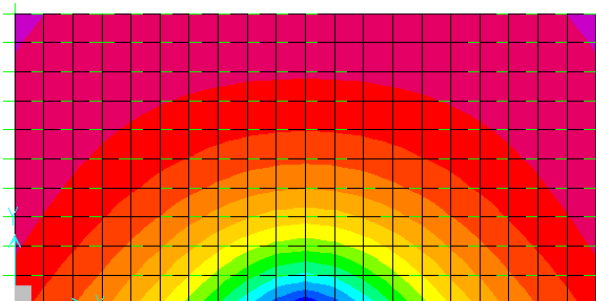
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmax} = 17,60 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmax} = 4,00 \text{ kNm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{max} = 1,287 \text{ MPa}$

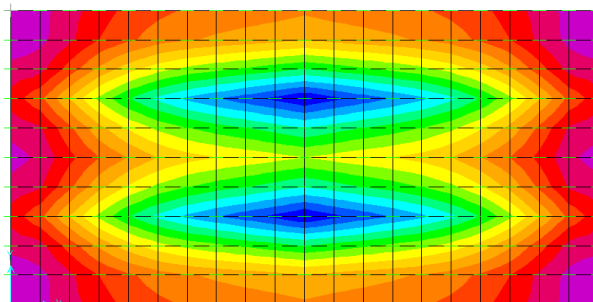


Deflexão máxima – $\omega_{max} = 0,300 \text{ mm}$

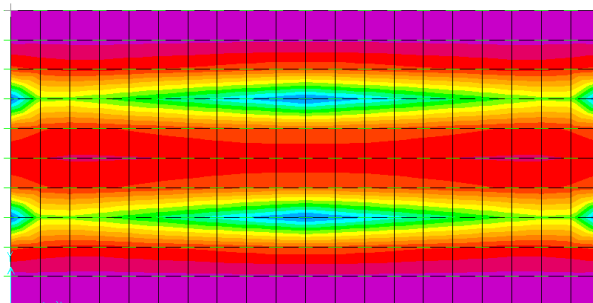
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

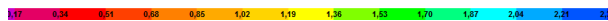
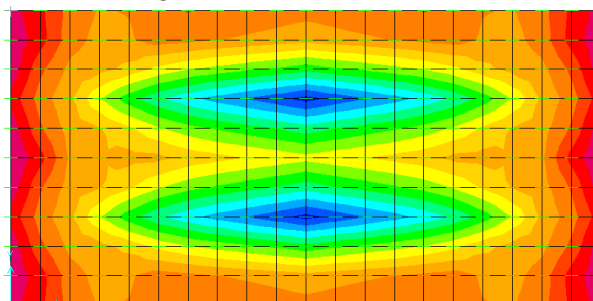
b.1.1) Direção longitudinal



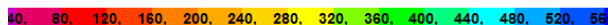
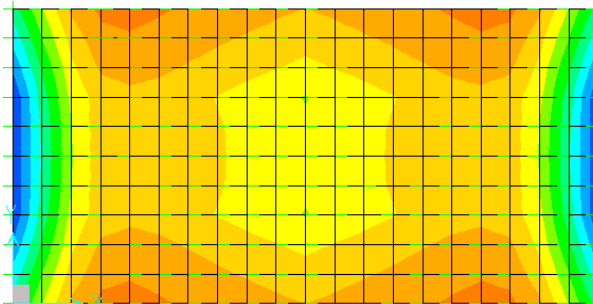
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 17,90$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 13,70$ kNm/m

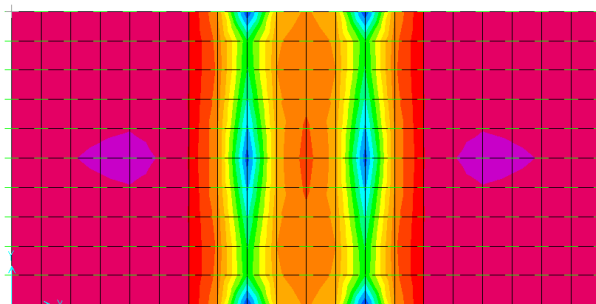


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,438$ MPa

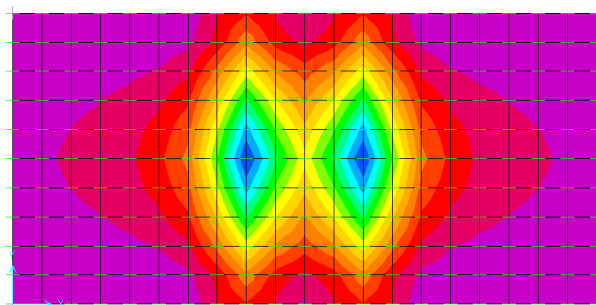


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,600$ mm

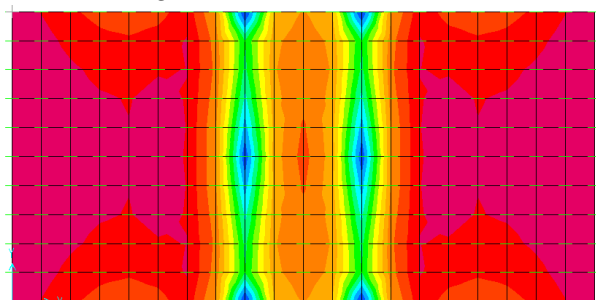
b.1.2) Direção transversal



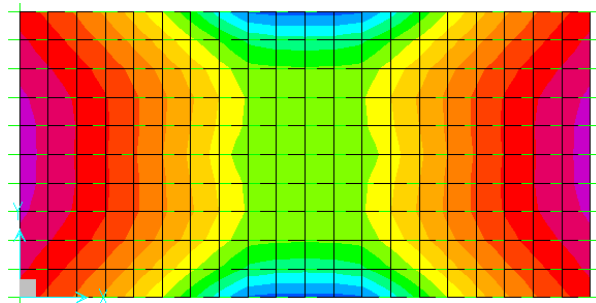
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 15,60$ kNxm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 16,90$ kNxm/m



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,126$ MPa

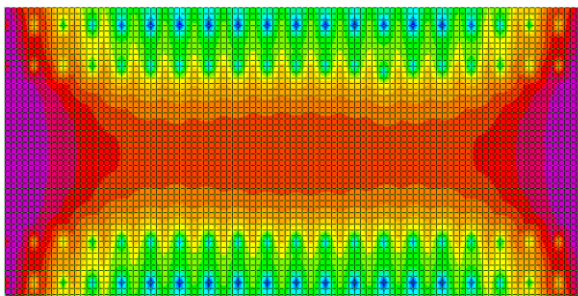


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,500$ mm

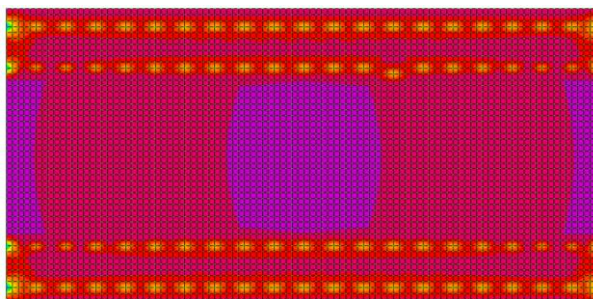
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 21,00$ cm

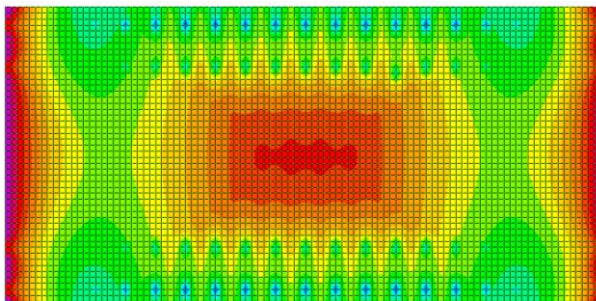
c.1.1) Direção longitudinal



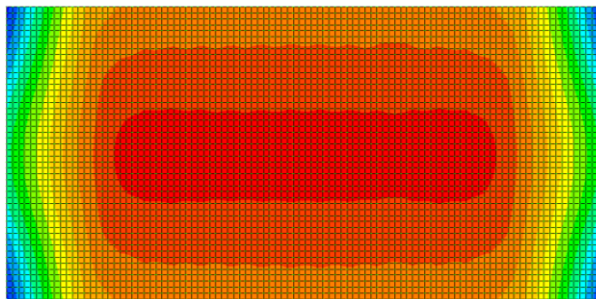
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 34,70$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 33,40$ kNm/m



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 3,946$ MPa

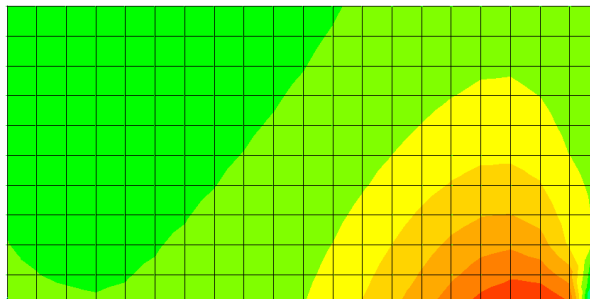


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 1,900$ mm

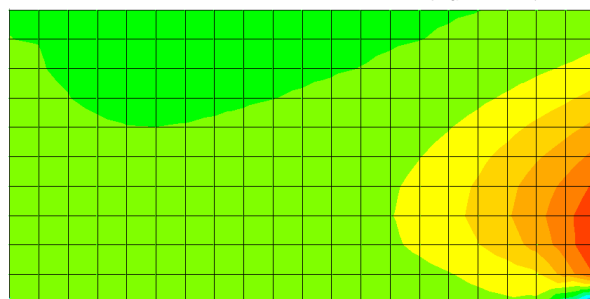
5.3.2.4 Modelo IV

a) Carga estática - Semieixo (Modelos Analíticos de Westergaard)

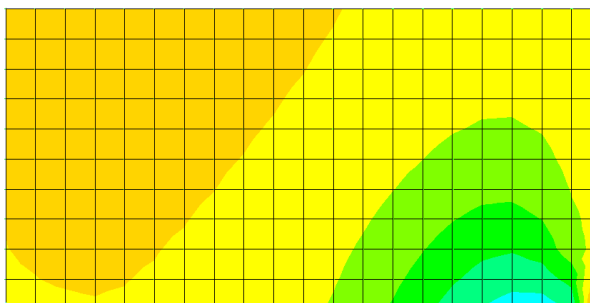
a.1) Caso I: Carga concentrada no canto da placa



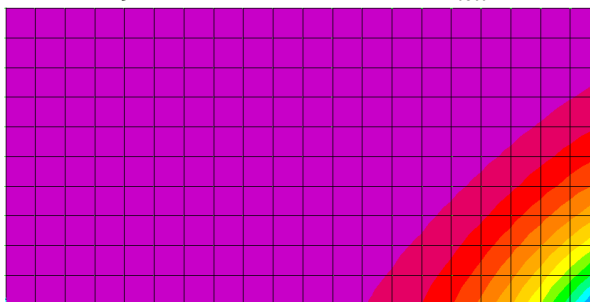
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 18,00 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 18,15 \text{ kNxm/m}$

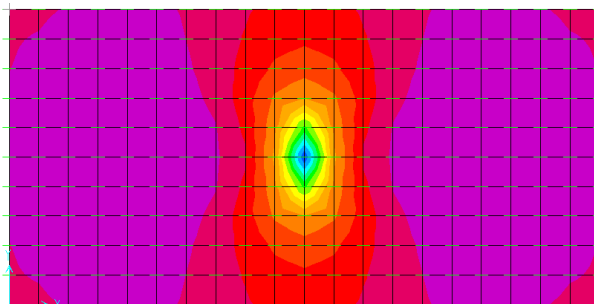


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,748 \text{ MPa}$

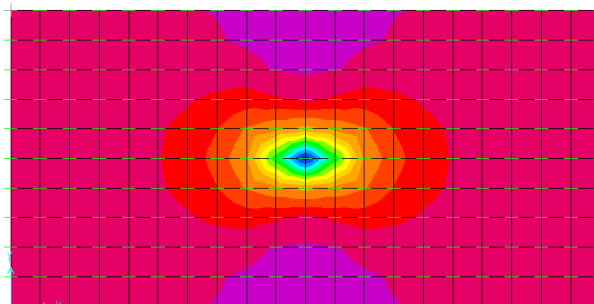


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 1,700 \text{ mm}$

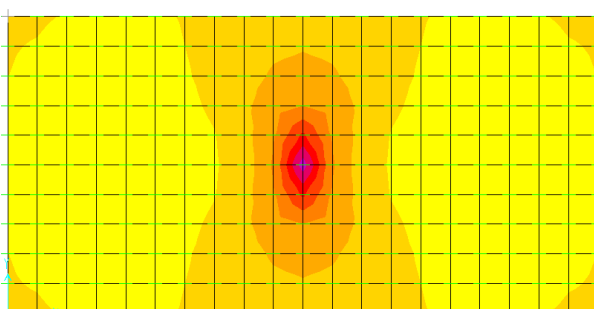
a.2) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga concentrada)



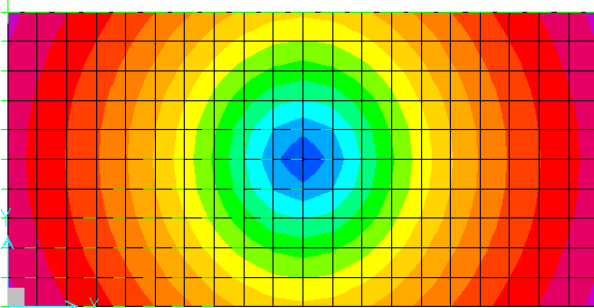
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 15,50 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 15,10 \text{ kNm/m}$

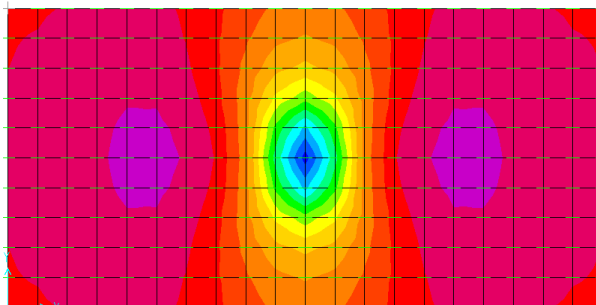


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,326 \text{ MPa}$

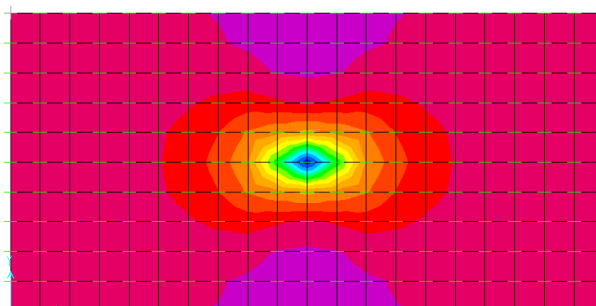


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,200 \text{ mm}$

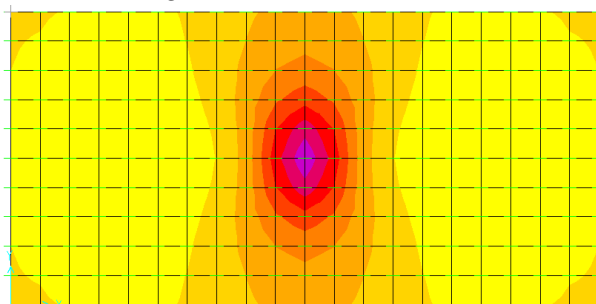
a.3) Caso II: Carga concentrada no interior da placa (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu com a placa)



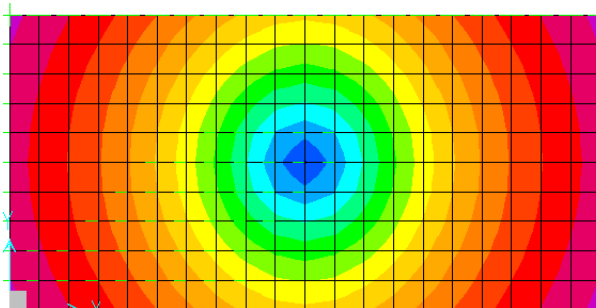
Momento fletor transversal máximo – $M_{t\max} = 8,70 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{l\max} = 8,30 \text{ kNm/m}$

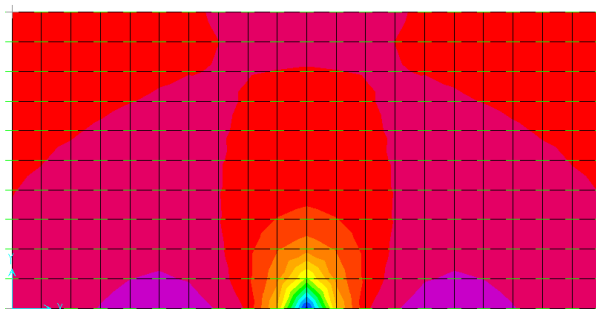


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{\max} = 1,303 \text{ MPa}$

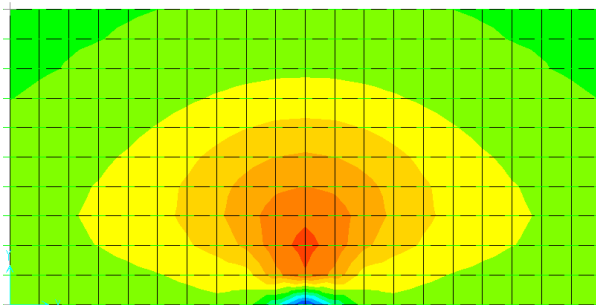


Deflexão máxima – $\omega_{\max} = 0,200 \text{ mm}$

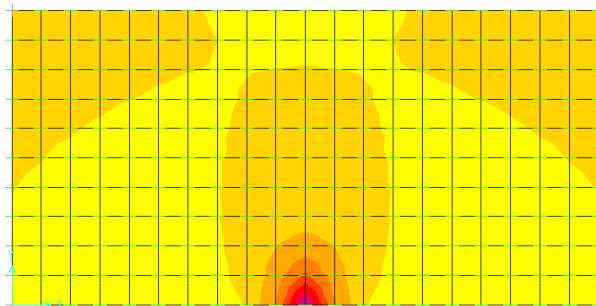
a.4) Caso III: Carga concentrada na borda da placa



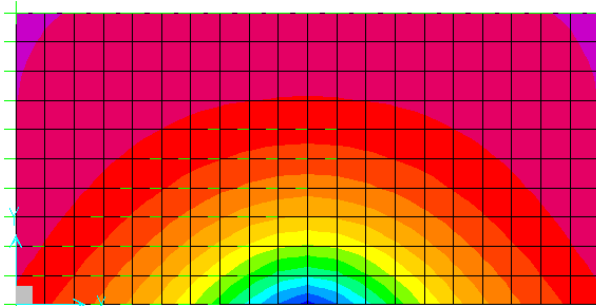
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 17,40 \text{ kNm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 3,95 \text{ kNm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 1,417 \text{ MPa}$

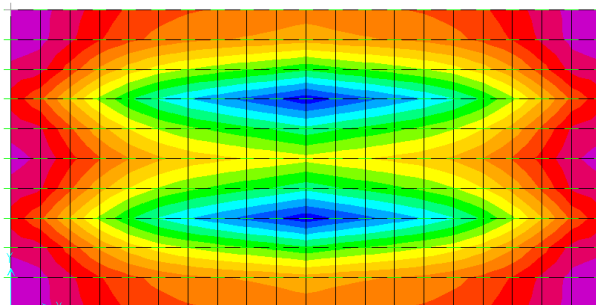


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,300 \text{ mm}$

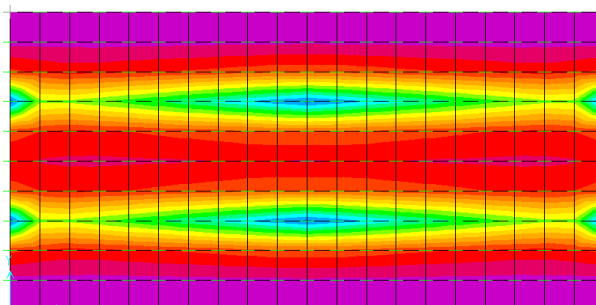
b) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples)

b.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

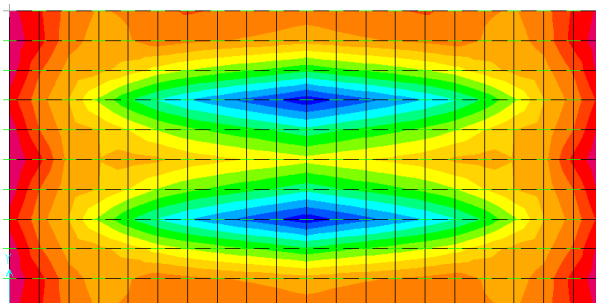
b.1.1) Direção longitudinal



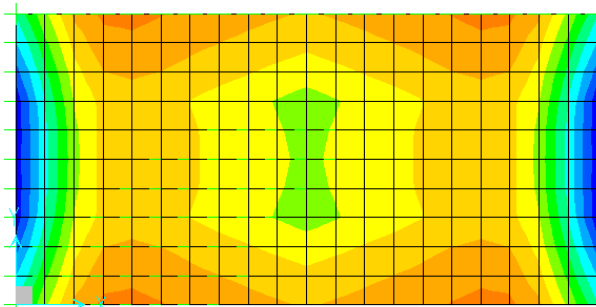
Momento fletor transversal máximo – $M_{tm\acute{a}x} = 17,50$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lm\acute{a}x} = 13,60$ kNm/m

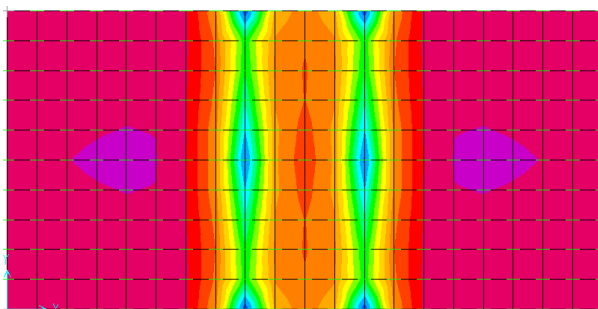


Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{m\acute{a}x} = 2,627$ MPa

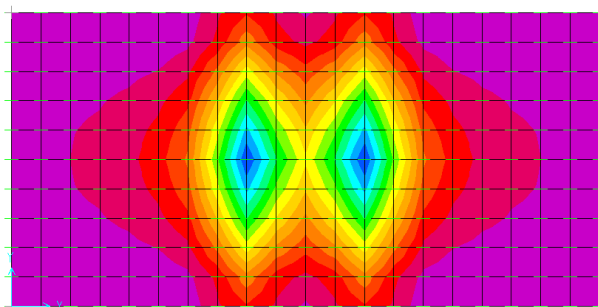


Deflexão máxima – $\omega_{m\acute{a}x} = 0,600$ mm

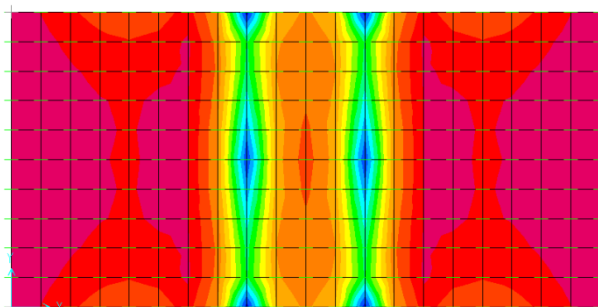
b.1.2) Direção transversal



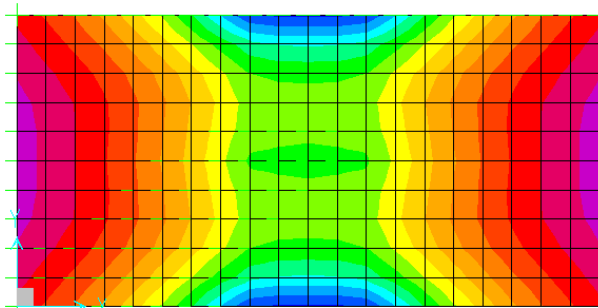
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 15,30 \text{ kNxm/m}$



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 16,70 \text{ kNxm/m}$



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 2,299 \text{ MPa}$

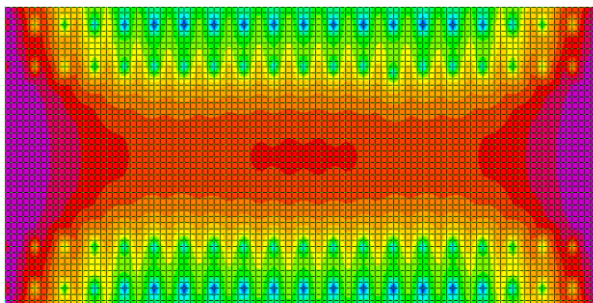


Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 0,500 \text{ mm}$

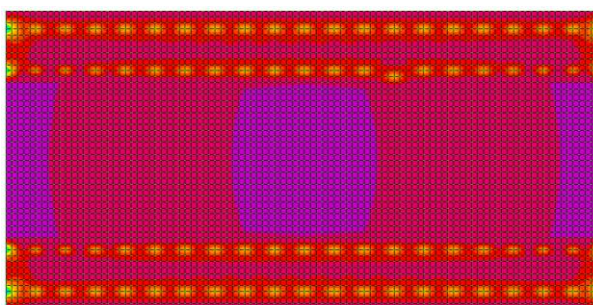
c) Carga móvel – Eixo (Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla)

c.1) Espessura da placa de concreto simples – $h = 20,00$ cm

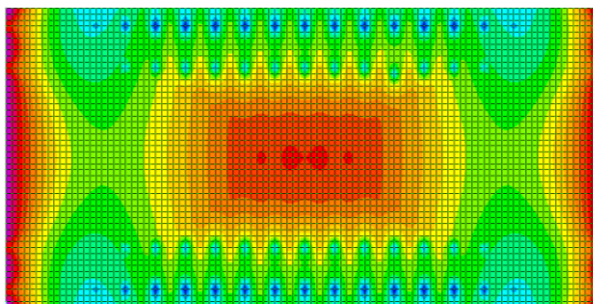
c.1.1) Direção longitudinal



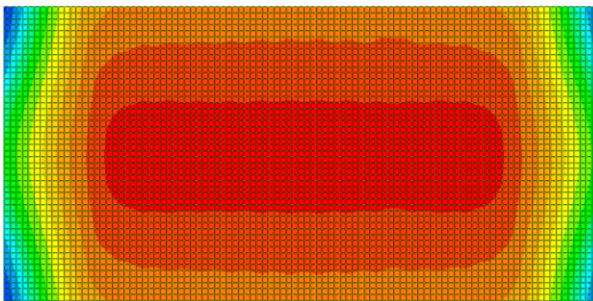
Momento fletor transversal máximo – $M_{tmáx} = 34,20$ kNm/m



Momento fletor longitudinal máximo – $M_{lmáx} = 33,30$ kNm/m



Tensão de tração na flexão máxima - $\sigma_{máx} = 3,864$ MPa



Deflexão máxima – $\omega_{máx} = 2,000$ mm

5.4 Análise dos resultados

5.4.1 Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$)

5.4.1.1 Carregamento estático (semi- eixo) – Modelo analítico de Westergaard

As Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam, respectivamente, os resultados teóricos (calculados através das equações propostas pelo modelo analítico de Westergaard com os parâmetros dos projetos estruturais apresentados no Anexo B), os resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais – vigas de concreto sobre base elástica (*Ftool versão 3.00*) e os resultados obtidos através das análises dos modelos bidimensionais – placas de concreto sobre base elástica (*SAP 2.000 versão 14.2*) dos momentos fletores máximos ($M_{m\acute{a}x}$).

Tabela 5.10 – Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$) [kNm/m] - Resultados teóricos

Modelo	Caso I	Caso II	Caso III
	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo
I	18,43	13,12	28,73
II	19,34	13,66	29,66
III	16,91	11,87	25,70
IV	18,41	12,93	27,89

Tabela 5.11 – Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$) [kNm] – Resultados modelos unidimensionais

Viga L (l1 = 5,00 m)	Modelo	Caso I	Caso III
		Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
Viga W (l2 = 2,50 m)	I	21,94	17,89
	II	18,97	15,13
	III	17,35	13,62
	IV	16,81	13,17

Tabela 5.12 – Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$) [kNm/m] - Resultados modelos bidimensionais

	Modelo	Caso I	Caso II – a*	Caso II – b**	Caso III
		Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo
Longitudinal	I	17,40	16,00	9,00	4,15
	II	17,70	15,60	8,70	4,04
	III	18,00	15,30	8,40	4,00
	IV	18,15	15,10	8,30	3,95
	Modelo	Caso I	Caso II – a*	Caso II – b**	Caso III
		Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo	Momento fletor positivo máximo
Transversal	I	18,30	17,60	10,70	19,30
	II	18,20	16,40	9,60	18,30
	III	17,85	15,80	8,90	17,60
	IV	18,00	15,50	8,70	17,40

*Caso II – a: Carga concentrada;

** Caso II – b: Carga uniformemente distribuída sobre a área de contato dos pneus.

▪ **Resultados teóricos x Resultados modelos numéricos unidimensionais:**

Para a Viga L ($l_1 = 5,00$ m), direção longitudinal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto (momento fletor negativo máximo), os Modelos I e III apresentam resultados, respectivamente, 19,05% e 2,60% superiores aos resultados teóricos. Os Modelos II e IV apresentam resultados, respectivamente, 1,91% e 8,69% inferiores aos resultados teóricos. No Caso III – carga concentrada na borda (momento fletor positivo máximo), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados, consideravelmente, inferiores aos resultados teóricos, em média 46,63%.

Para a Viga W ($l_2 = 2,50$ m), direção transversal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto (momento fletor negativo máximo), o Modelo I apresenta resultado 3,64% superior ao resultado teórico. Em relação aos demais modelos analisados (II, III e IV), observa-se que os resultados apresentados são 7,39%; 0,24% e 10,48% inferiores aos respectivos resultados teóricos. No Caso III – carga concentrada na borda (momento fletor positivo máximo), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), novamente, apresentam resultados inferiores aos resultados teóricos, em média 45,99%.

Em resumo, no Caso I, nota-se que a tendência dos quatro modelos analisados (I, II, III e IV), seja na direção longitudinal (Viga L) ou na direção transversal (Viga W), é apresentar resultados muito próximos aos resultados

teóricos. Na direção longitudinal (Viga L), destacam-se positivamente os Modelos II, III e IV. Já, na direção transversal (Viga W), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados satisfatórios.

No Caso III, os resultados apresentados pelos quatro modelos analisados (I, II, III e IV), seja na direção longitudinal (Viga L) ou na direção transversal (Viga W) são consideravelmente inferiores aos resultados teóricos, respectivamente, 46,63% e 45,99%, conforme mencionado anteriormente.

Em relação aos resultados teóricos, destaca-se que para os três casos de carregamento analisados (I, II e III), o Modelo II ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 60,00$ MPa/m) é o que apresenta os maiores momentos fletores máximos e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta os menores momentos fletores máximos.

No tocante aos resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais, ressalta-se que, tanto na direção longitudinal (Viga L) quanto na direção transversal (Viga W), para os dois casos de carregamento analisados (I e III), o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) apresenta os maiores momentos fletores máximos e o Modelo IV ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 97,50$ MPa/m) apresenta os menores momentos fletores máximos.

▪ **Resultados teóricos x Resultados modelos numéricos bidimensionais:**

No Caso I – carga concentrada no canto (momento fletor negativo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$), observa-se que os resultados apresentados pelos quatro modelos analisados (I, II, III e IV) se encontram muito próximos aos resultados teóricos. Destaca-se o Modelo III, pois é o único que apresenta resultado 5,56% superior ao resultado teórico. Quanto aos demais modelos (I, II e IV), os resultados são, respectivamente, 0,71%; 5,89% e 2,23% inferiores aos resultados teóricos. Agora, avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), observa-se que os modelos analisados seguem a mesma tendência evidenciada anteriormente. O Modelo III apresenta resultado 6,45% superior ao resultado teórico e, os demais modelos (I, II e IV) apresentam resultados 5,59%; 8,48% e 1,41% inferiores aos respectivos resultados teóricos.

No geral, evidencia-se que os resultados apresentados pelos modelos numéricos bidimensionais desenvolvidos sob a condição de carregamento do Caso I são satisfatórios.

No Caso II – a (carga concentrada) – carga concentrada no interior (momento fletor positivo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tm\acute{a}x}$), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 26,80%. Avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lm\acute{a}x}$), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) também apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 20,46%.

No Caso II – b (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu – forma geométrica retangular) – carga concentrada no interior (momento fletor positivo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tm\acute{a}x}$), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores aos resultados teóricos, em média 26,48%. Em relação ao momento fletor longitudinal máximo ($M_{lm\acute{a}x}$), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) seguem a mesma tendência e, novamente, apresentam resultados inferiores aos resultados teóricos, em média 33,19%.

Ressalta-se que o Caso II é a condição de carregamento adotada pelo método de dimensionamento das placas de concreto simples para pisos industriais (Método da PCA) – ver Capítulo 4. Logo, ao configurar o carregamento como uma carga concentrada, situada no interior da placa de concreto, mais especificamente, na região central da placa, nota-se que há um acréscimo considerável nos valores dos momentos fletores positivos máximos para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV). No entanto, ao configurar o carregamento como uma carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu com forma geométrica retangular, igualmente situada no interior da placa de concreto (na região central), nota-se que há um decréscimo nos valores dos momentos fletores positivos máximos para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV).

De modo geral, além da forma geométrica adotada nos modelos numéricos analisados neste trabalho, a área de contato entre o pneu e a placa de concreto também pode assumir a forma geométrica circular (hipótese adotada no modelo analítico de Westergaard) e elíptica. Segundo estudos anteriores (Oliveira, 2000), para uma mesma pressão de enchimento do pneu e área de contato entre o pneu e a placa de concreto, a adoção de diferentes configurações não interfere significativamente nos esforços e, ainda de acordo com os mesmos, a área

retangular costuma fornecer resultados coerentes em placas de concreto sobre base elástica.

No entanto, através das análises numéricas apresentadas anteriormente, nota-se que para a configuração carga concentrada (Caso II – a) e carga uniformemente distribuída sobre área de contato do pneu – forma geométrica retangular (Caso II – b), há diferenças significativas nos esforços, sendo que os resultados ilustrados pelos quatro modelos bidimensionais (placas de concreto sobre base elástica) para a primeira configuração (Caso II – a) são superiores aos respectivos resultados teóricos e para a segunda configuração (Caso II – b) são inferiores a esses, conforme mencionado anteriormente.

Em relação ao momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$), observa-se que para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), os resultados apresentados para configuração de carga concentrada (Caso II – a) são 42,05% (em média) superiores aos resultados apresentados pela configuração de carga uniformemente distribuída sobre área de contato do pneu (Caso II – b). Quanto ao momento longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), observa-se um comportamento semelhante ao anterior, isto é, para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), os resultados apresentados para configuração de carga concentrada (Caso II – a) são 44,53% (em média) superiores aos resultados apresentados pela configuração de carga uniformemente distribuída sobre área de contato do pneu (Caso II – b).

No Caso III - carga concentrada na borda (momento fletor positivo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$), observa-se que os resultados apresentados pelos quatro modelos analisados (I, II, III e IV) são inferiores aos resultados teóricos, em média 35,06%. Para o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), novamente, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados, consideravelmente, inferiores aos resultados teóricos, em média 85,55%.

Conforme ocorreu com os resultados apresentados pelos modelos unidimensionais, para o Caso III, tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal da placa de concreto, os momentos fletores máximos obtidos através das análises dos modelos bidimensionais seguem a mesma tendência e, também são, consideravelmente, inferiores aos resultados teóricos.

De acordo com Rodrigues et al. (2006) e, anteriormente, ilustrado através da Tabela 5.2, em relação à distribuição de esforços em placas isoladas de concreto

sobre base elástica, sabe-se que o momento fletor gerado pela carga posicionada na borda da placa (Caso III) é aproximadamente, o dobro do momento fletor gerado pela mesma carga posicionada no interior da placa (Caso II) e, que esse decresce à medida que a carga se afasta da borda. Já, o momento fletor negativo gerado pela carga posicionada no canto da placa (Caso I), geralmente, assume valores da ordem 1,70 do momento fletor positivo gerado pela carga posicionada no interior da placa (Caso II).

Quanto aos resultados apresentados pelos quatro modelos bidimensionais analisados (I, II, III e IV), primeiramente, avalia-se a relação entre os momentos fletores transversais máximos ($M_{tmáx}$) para os Casos III e II – a e, observa-se que os resultados apresentados no Caso III são 44,39% (em média) inferiores aos resultados esperados ($2,00 M_{II}$). Agora, avalia-se a relação entre os momentos fletores longitudinais máximos ($M_{lmáx}$), ainda para os Casos III e II – a, observa-se que os resultados apresentados no Caso III são 86,98% (em média) inferiores aos resultados esperados ($2,00 M_{II}$).

Por seguinte, avalia-se a relação entre os momentos fletores transversais máximos ($M_{tmáx}$) para os Casos III e II – b e, observa-se que, para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), os resultados apresentados no Caso III são 3,91% (em média) inferiores aos resultados esperados ($2,00 M_{II}$). Destaca-se o Modelo I, pois apresenta a maior diferença entre os valores comparados, da ordem de 9,81%. Avalia-se a relação entre os momentos fletores longitudinais máximos ($M_{lmáx}$) dos Casos III e II – b, observa-se que os resultados apresentados no Caso III também são inferiores aos resultados esperados ($2,00 M_{II}$), 76,53% em média.

Avaliando-se os resultados apresentados pelos quatro modelos bidimensionais analisados (I, II, III e IV), mais especificamente, a relação entre os momentos fletores transversais ($M_{tmáx}$) e longitudinais ($M_{lmáx}$) máximos para os Casos I e II – a, observa-se que os resultados apresentados no Caso I são, em média, 34,70% e 32,34% inferiores aos respectivos resultados esperados ($1,70 M_{II}$). Agora, avalia-se a relação entre os momentos fletores transversais ($M_{tmáx}$) e longitudinais ($M_{lmáx}$) máximos para os Casos I e II – b e, observa-se que os resultados apresentados no Caso I são, em média, 12,95% e 22,02% superiores aos respectivos resultados esperados ($1,70 M_{II}$).

Através das análises dos modelos bidimensionais, em relação aos momentos fletores transversais máximos ($M_{tmáx}$), observa-se que o Modelo I ($h = 21,00$ cm e k_{inc}

= 40,00 MPa/m) apresenta os maiores resultados nos quatro casos analisados (I, II – a, II – b e III). O Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) apresenta o menor resultado no Caso I e o Modelo IV ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 97,50$ MPa/m) apresenta os menores resultados nos Casos II – a, II – b e III. Agora, em relação aos momentos fletores longitudinais máximos ($M_{lmáx}$), o Modelo IV ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 97,59$ MPa/m) apresenta o maior resultado no Caso I e os menores resultados nos Casos II – a, II – b e III, enquanto o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) apresenta os maiores resultados nos Casos II – a, II – b e III e o menor resultado no Caso I.

▪ **Resultados modelos numéricos unidimensionais x Resultados modelos numéricos bidimensionais:**

Ao comparar os resultados das análises dos modelos unidimensionais (vigas de concreto sobre base elástica) e bidimensionais (placas de concreto sobre base elástica), no Caso I – carga concentrada no canto (momento fletor negativo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$), nota-se que o resultado do Modelo I unidimensional é 4,19% superior ao resultado do Modelo I bidimensional. Os demais modelos unidimensionais analisados (II, III e IV) apresentam resultados 1,62%; 5,81% e 9,22% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais. Ainda no Caso I, avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), observa-se que os Modelos I e II unidimensionais apresentam resultados 20,69% e 6,69% superiores aos respectivos modelos bidimensionais. Já, os Modelos III e IV unidimensionais apresentam resultados 3,75% e 7,97% inferiores aos respectivos modelos bidimensionais. Destaca-se o Modelo I, pois apresenta a maior diferença entre os valores comparados. No geral, os resultados são satisfatórios.

No Caso III - carga concentrada na borda (momento fletor positivo máximo), avaliando-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$), observa-se que os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores aos respectivos modelos bidimensionais, em média 20,27%. Agora, avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), observa-se que os resultados apresentados pelos quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) são, consideravelmente, superiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais, em média 72,68%.

A seguir, as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 ilustram o comportamento dos modelos unidimensionais e bidimensionais analisados diante os resultados teóricos calculados neste estudo.

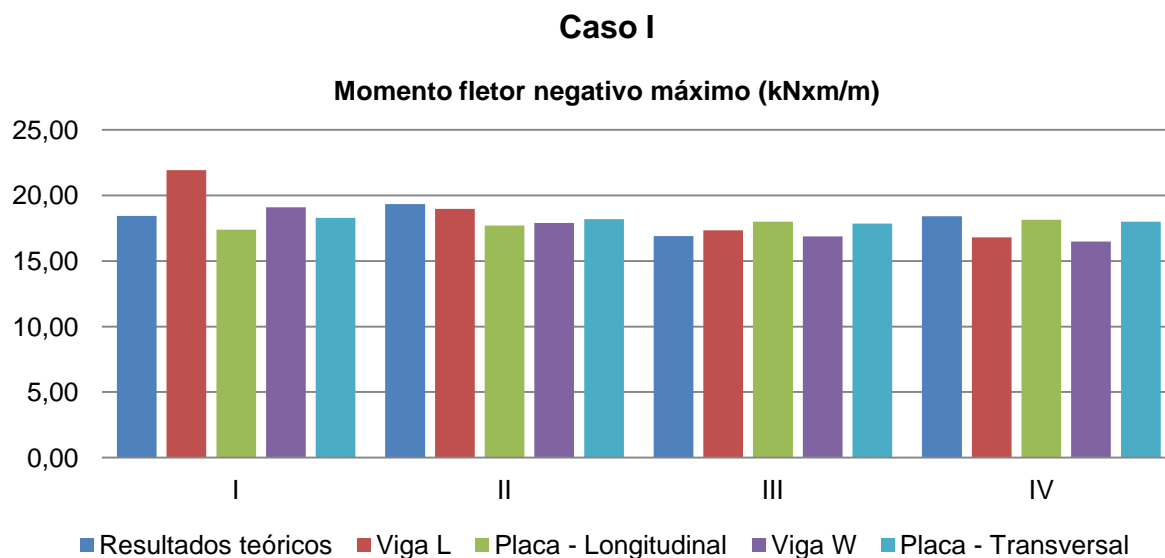


Figura 5.1 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$): Caso I

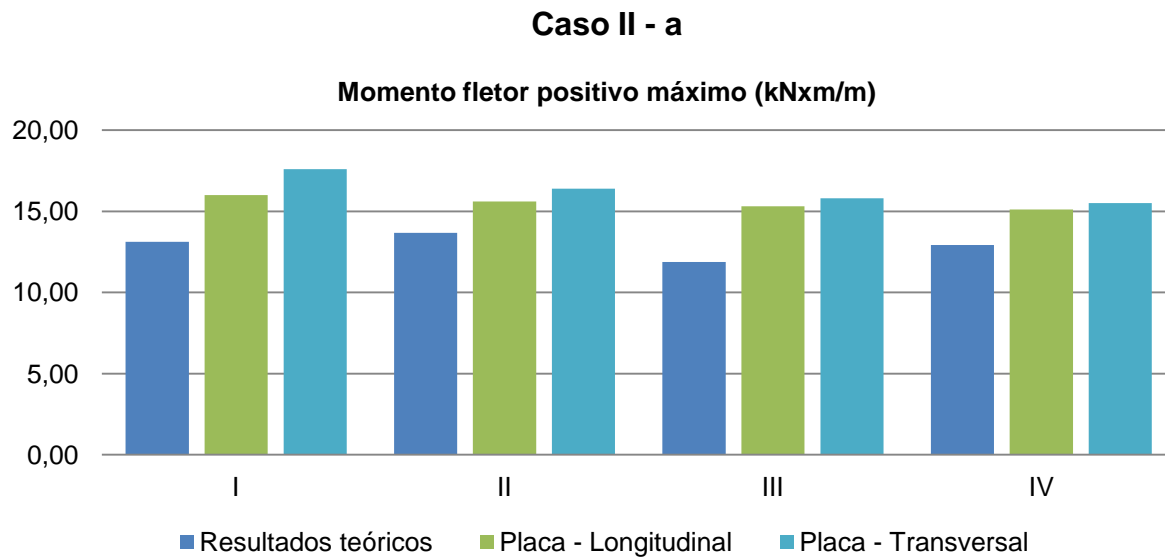


Figura 5.2 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$): Caso II – a

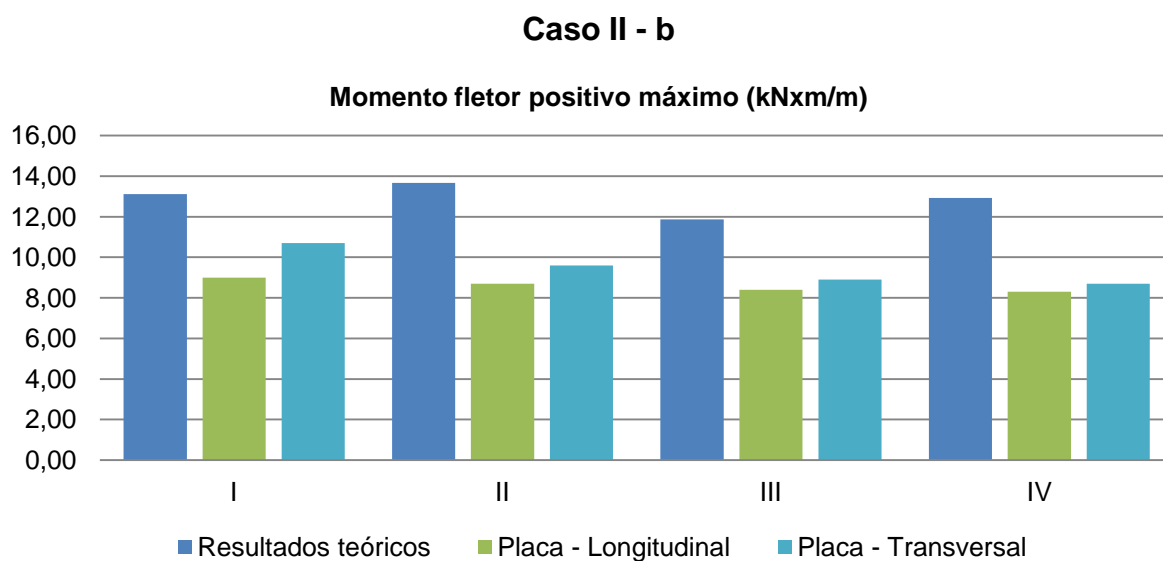


Figura 5.3 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso II – b

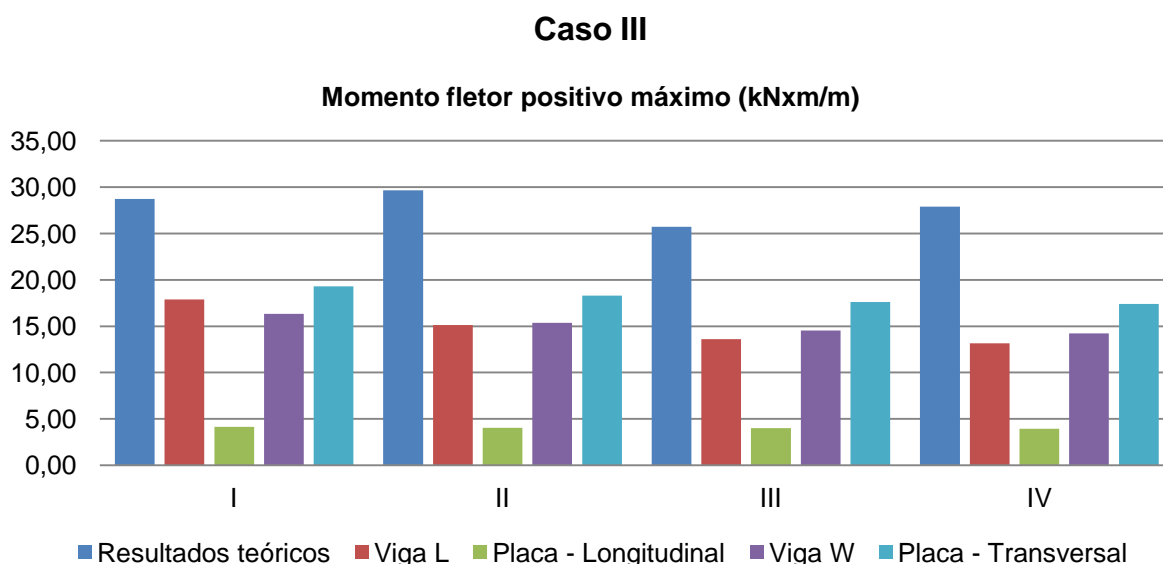


Figura 5.4 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso III

Por fim, para todas as configurações de carregamento adotadas - Caso I, II e III, nenhum dos modelos analisados (I, II, III e IV), unidimensionais e bidimensionais, apresenta momentos fletores máximos ($M_{máx}$) superiores aos respectivos momentos fletores de fissuração do concreto simples ($M_1 = 30,35$ kNxm/m para os Casos I e III e $M_2 = 27,53$ kNxm/m para os Casos II e IV).

5.4.1.2 Carregamento móvel (eixo) – Tráfego das empilhadeiras

As Tabelas 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais – vigas de concreto sobre base elástica (*Ftool* versão 3.00) e os resultados obtidos através das análises dos modelos bidimensionais – placas de concreto sobre base elástica (*SAP* 2.000 versão 14.2).

Tabela 5.13 – Envoltórias de momento fletor [kNm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples

Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples - $p_1 = 2 \times 57,50$ kN			
Viga L ($l_1 = 5,00$ m)	Modelo	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	21,94	18,43
	II	18,97	14,89
	III	17,35	13,10
	IV	16,81	12,55
Viga W ($l_2 = 2,50$ m)	Modelo	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	19,10	15,20
	II	17,91	14,34
	III	16,87	13,74
	IV	15,90	13,47

Tabela 5.14 – Envoltórias de momento fletor [kNm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem duplo (continua)

Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem duplo - $p_2 = 4 \times 47,10$ kN				
Viga L ($l_1 = 5,00$ m)	Modelo	Espessura - h (cm)	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	21,00	26,19	22,27
	II	20,00	21,74	18,80
	III	21,00	19,43	16,62
	IV	20,00	18,90	16,00
Viga W ($l_2 = 2,50$ m)	Modelo	Espessura - h (cm)	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	21,00	26,62	19,42
	II	20,00	24,59	18,00
	III	21,00	22,82	16,77
	IV	20,00	22,16	16,32

Tabela 5.14 – Envoltórias de momento fletor [kNm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla (conclusão)

Viga L (l1 = 5,00 m)	Modelo	Espessura - h (cm)	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	24,00	30,13	24,79
	II	23,00	24,90	21,43
	III	24,00	22,01	19,02
	IV	23,00	21,25	18,39
Viga W (l2 = 2,50 m)	Modelo	Espessura - h (cm)	Momento fletor negativo máximo	Momento fletor positivo máximo
	I	24,00	27,66	20,14
	II	23,00	26,20	19,12
	III	24,00	24,75	18,11
	IV	23,00	24,30	17,80

Tabela 5.15 – Envoltórias de momento fletor [kNm/m] - Resultados modelos bidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples

Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples - $p_1 = 2 \times 57,50$ kN			
Direção Longitudinal	Modelo	Transversal	Longitudinal
	I	21,50	17,60
	II	19,20	14,00
	III	17,90	13,70
	IV	17,50	13,60
Direção Transversal	Modelo	Transversal	Longitudinal
	I	17,60	18,00
	II	16,50	17,40
	III	15,60	16,90
	IV	15,30	16,70

Tabela 5.16 – Envoltórias de momento fletor [kNm/m] - Resultados modelos bidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla

Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla - $p_2 = 4 \times 47,10$ kN			
Direção Longitudinal	Modelo	Transversal	Longitudinal
	I	33,10	28,30
	II	37,00	33,60
	III	34,70	33,40
	IV	34,20	33,30

▪ **Resultados modelos numéricos unidimensionais – Modelo analítico de Westergaard x Resultados modelos numéricos unidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples:**

Para a Viga L ($l_1 = 5,00$ m), direção longitudinal da placa de concreto, compara-se os momentos fletores negativos máximos ($M_{máx}^-$) e, observa-se que os resultados apresentados pelos modelos de viga de concreto sobre base elástica quando submetidas à carga estática (isto é, as condições de carregamento propostas pelo modelo analítico de Westergaard) são iguais aos resultados apresentados pelos mesmos modelos quando submetidos à carga móvel (isto é, ao deslocamento do trem tipo que representa o eixo dianteiro de uma empilhadeira com rodames pneumáticos e eixo de rodagem simples). Em relação aos momentos fletores positivos máximos ($M_{máx}^+$), observa-se pequenas diferenças entre os resultados. Para o Modelo I, o resultado apresentado pelo modelo quando submetido à carga estática é 3,02% inferior ao resultado apresentado pelo mesmo quando submetido à carga móvel. Para os demais modelos analisados (II, III e IV), observa-se que os resultados apresentados pelos modelos quando submetidos à carga estática são 1,59%; 3,82% e 4,71% superiores aos resultados apresentados pelos modelos submetidos à carga móvel.

Para a Viga W ($l_2 = 2,50$ m), direção transversal da placa de concreto, em relação aos momentos fletores negativos máximos ($M_{máx}^-$), observa-se que os resultados apresentados pelos modelos analisados para as duas configurações de carregamento propostas são iguais, exceto para o Modelo IV, cujo resultado apresentado pelo modelo submetido à carga estática é 3,52% superior ao resultado apresentado pelo modelo submetido à carga móvel. Quanto aos momentos fletores positivos máximos ($M_{máx}^+$), observa-se que os resultados apresentados pelos modelos analisados (I, II, III e IV) quando submetidos à carga estática são 6,02% (em média) superiores aos resultados apresentados pelos modelos submetidos à carga móvel.

As Figuras 5.5 e 5.6 ilustram os resultados analisados anteriormente.

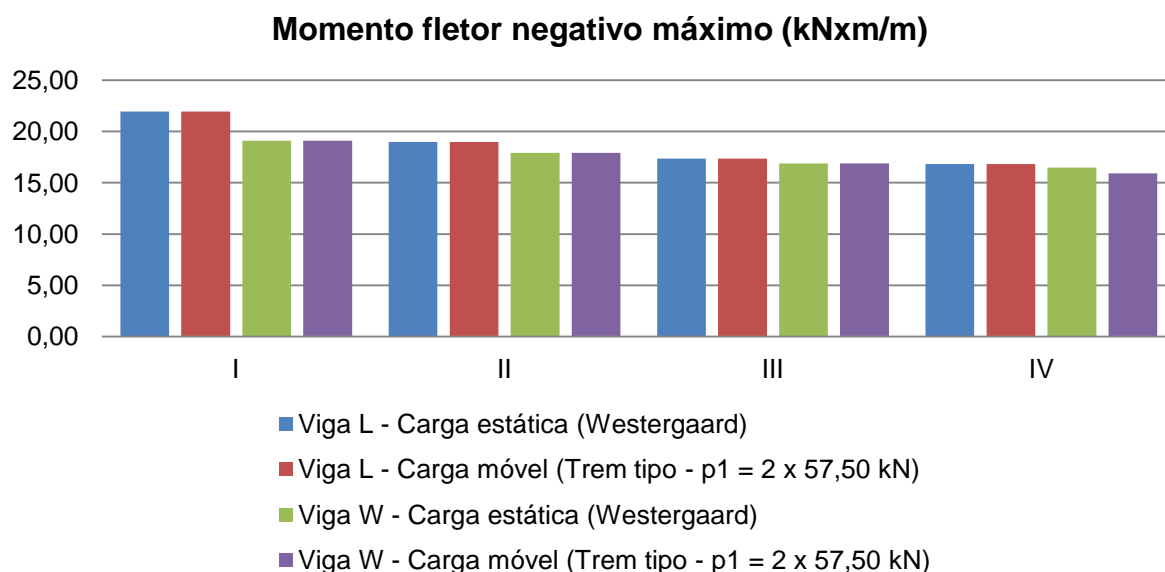


Figura 5.5 – Análise dos resultados: Momento fletor negativo máximo ($M_{máx}^-$)

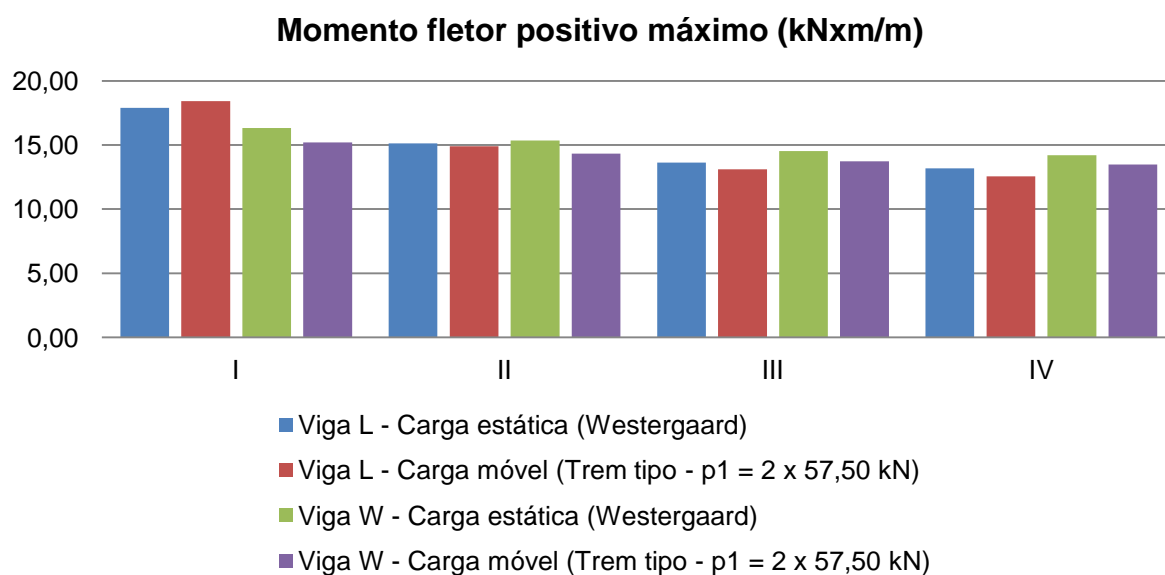


Figura 5.6 – Análise dos resultados: Momento fletor positivo máximo ($M_{máx}^+$)

- **Resultados modelos numéricos bidimensionais – Modelo analítico de Westergaard x Resultados modelos numéricos bidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples:**

Faz-se uma breve comparação entre os resultados apresentados pelos modelos de placa de concreto sobre base elástica quando submetidas à carga estática – isto é, quando se aplica uma determinada carga P em seu interior (região central), conforme proposto pelo modelo analítico de Westergaard (Caso II) e, de acordo com o método usual de dimensionamento de placas de concreto simples

para pisos industriais de concreto – com os resultados apresentados pelos modelos quando submetidos à carga móvel – ao deslocamento do trem tipo que representa o eixo dianteiro de uma empilhadeira com rodames pneumáticos e eixo de rodagem simples – $p_1 = 2 \times 57,50$ kN.

Para direção longitudinal da placa de concreto, avalia-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tm\acute{a}x}$) e, observa-se que para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) os resultados apresentados pelos modelos submetidos à carga estática são 16,36% (em média) inferiores aos resultados dos modelos submetidos à carga móvel. Destaca-se o Modelo I, pois é o que apresenta a maior discrepância entre os resultados, 22,16%. Ainda na direção longitudinal da placa, mas agora, avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lm\acute{a}x}$), observa-se que o Modelo I é o único que apresenta o resultado para o modelo submetido à carga estática 10,00% inferior ao resultado do modelo submetido à carga móvel. Os demais modelos analisados (II, III e IV) apresentam para os modelos submetidos à carga estática resultados 10,26%; 10,46% e 9,93% superiores aos resultados apresentados pelos modelos submetidos à carga móvel.

Para direção transversal da placa de concreto, avalia-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tm\acute{a}x}$), observa-se que para o Modelo I os resultados apresentados pelas duas configurações de carregamento são iguais. Já, o Modelo II é o único que apresenta o resultado do modelo submetido à carga estática 0,61% inferior ao resultado apresentado pelo modelo submetido à carga móvel. Os Modelos III e IV apresentam os resultados dos modelos submetidos à carga estática 1,27% e 1,29% superiores aos resultados dos modelos submetidos à carga móvel. Avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lm\acute{a}x}$), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam os resultados dos modelos submetidos à carga estática 11,27% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos submetidos à carga móvel.

As Figuras 5.7 e 5.8 ilustram os resultados analisados anteriormente.

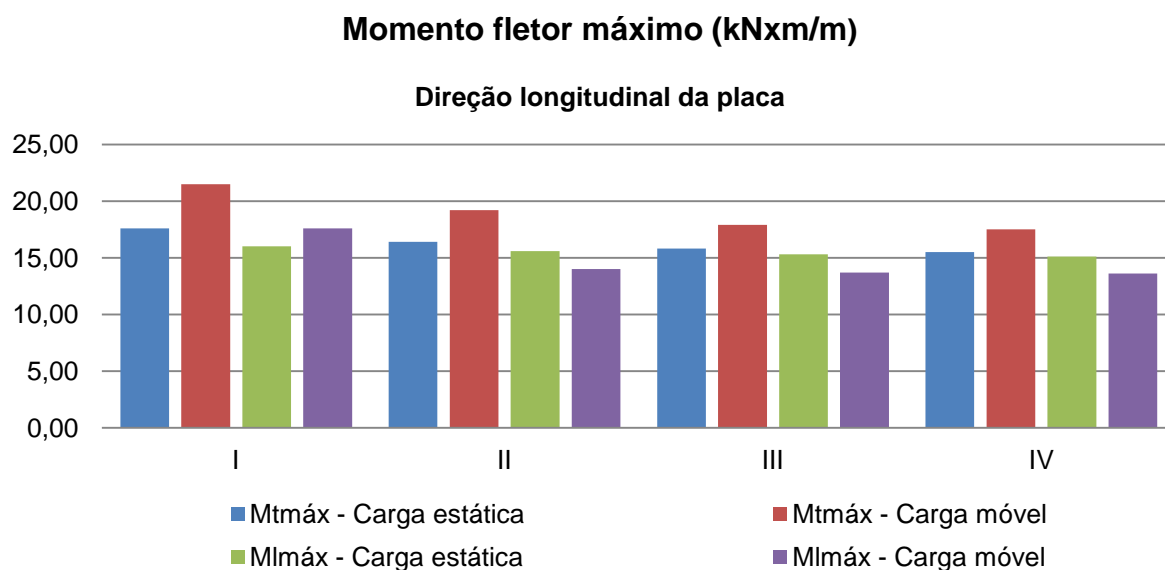


Figura 5.7 – Análise dos resultados: Momento fletor máximo – Direção longitudinal da placa

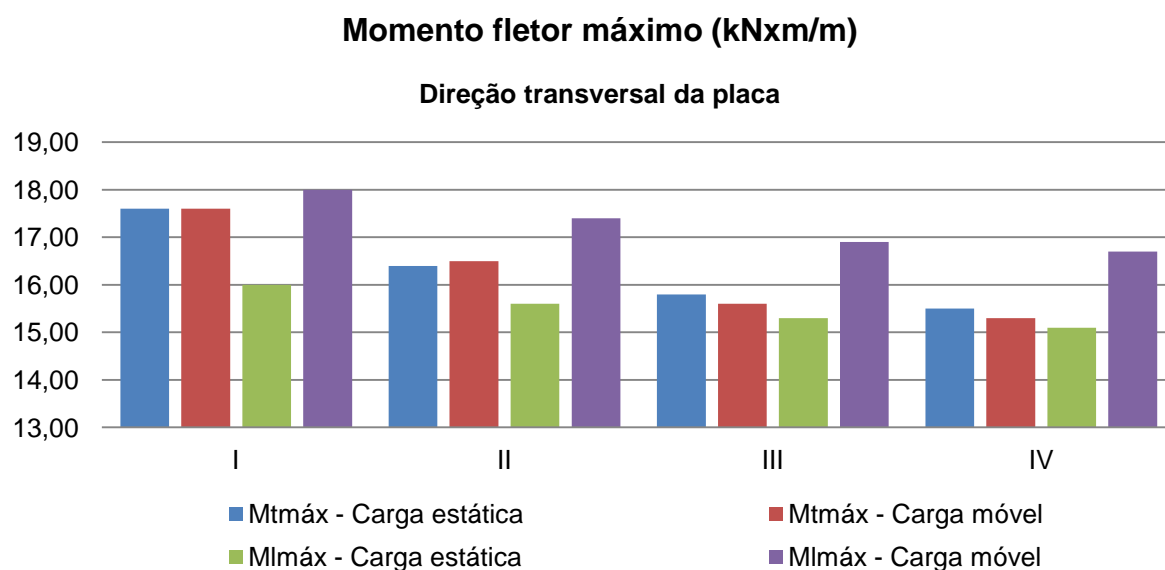


Figura 5.8 – Análise dos resultados: Momento fletor máximo – Direção transversal da placa

- **Resultados modelos numéricos unidimensionais x Resultados modelos numéricos bidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples:**

Para a direção longitudinal da placa de concreto, avalia-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$) e, observa-se que para os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) os resultados apresentados são 30,42% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais. Avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$), observa-se que os

Modelos unidimensionais I e II apresentam resultados 4,50% e 5,98% superiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais. No entanto, os Modelos unidimensionais III e IV apresentam resultados 4,58% e 8,37% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais.

Para a direção transversal da placa de concreto, avalia-se o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$) e, observa-se que para os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) os resultados apresentados são 14,49% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais. Avaliando-se o momento fletor longitudinal máximo ($M_{lmáx}$) e, observa-se que para os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) os resultados apresentados são 21,68% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais.

▪ **Resultados modelos numéricos unidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples x Resultados modelos numéricos unidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem dupla:**

Para a Viga L , direção longitudinal da placa de concreto, tanto para o momento fletor negativo máximo ($M_{máx}$) quanto para o momento fletor positivo máximo ($M^+_{máx}$), os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) quando submetidos ao tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples apresentam resultados 14,60% e 25,36% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos unidimensionais para o tráfego de empilhadeiras com eixo de rodagem dupla.

Para a Viga W , direção transversal da placa de concreto, novamente, tanto para o momento fletor negativo máximo ($M_{máx}$) quanto para o momento fletor positivo máximo ($M^+_{máx}$), os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) quando submetidos ao tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples apresentam resultados 37,83% e 24,12% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos unidimensionais para o tráfego de empilhadeiras com eixo de rodagem dupla.

- **Resultados modelos numéricos bidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem simples x Resultados modelos numéricos bidimensionais - Tráfego das empilhadeiras com eixo de rodagem dupla:**

Para direção longitudinal da placa de concreto, avalia-se tanto o momento fletor transversal máximo ($M_{tmáx}$) quanto o momento longitudinal máximo ($M_{lmáx}$) e, observa-se que para os quatro modelos bidimensionais analisados (I, II, III e IV) quando submetidos ao tráfego de empilhadeiras com eixo de rodagem simples apresentam resultados 45,10% e 53,57% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais para o tráfego de empilhadeiras com eixo de rodagem dupla.

5.4.2 Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{máx}$)

5.4.2.1 Carregamento estático (semi- eixo) – Modelos analíticos de Westergaard

As Tabelas 5.17, 5.18 e 5.19 apresentam, respectivamente, os resultados teóricos (calculados através das equações propostas pelos modelos analíticos de Westergaard com os parâmetros dos projetos estruturais), os resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais – vigas de concreto (*Ftool versão 3.00*) e os resultados obtidos através das análises dos modelos bidimensionais – placas de concreto (*SAP 2.000 versão 14.2*) das tensões de tração na flexão máximas ($\sigma_{máx}$).

Tabela 5.17 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{máx}$) [MPa] – Resultados teóricos

Modelo	Face superior da placa		Face inferior da placa	
	Caso I	Caso II	Caso III	Caso III
I	2,51	1,78	3,91	
II	2,63	1,86	4,03	
III	2,30	1,62	3,50	
IV	2,50	1,76	3,79	

Tabela 5.18 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) [MPa] – Resultados modelos unidimensionais

Viga L ($l_1 = 5,00$ m)	Modelo	Caso I	Caso III
		Face superior da placa	Face inferior da placa
	I	2,99	2,43
	II	2,85	2,27
	III	2,36	1,85
	IV	2,52	1,98
Viga W ($l_2 = 2,50$ m)	Modelo	Caso I	Caso III
		Face superior da placa	Face inferior da placa
	I	2,60	2,22
	II	2,69	2,30
	III	2,30	1,98
	IV	2,47	2,13

Tabela 5.19 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) [MPa] – Resultados modelos bidimensionais

Modelo	Caso I	Caso II – a*	Caso II – b**	Caso III
	Face superior da placa	Face inferior da placa	Face inferior da placa	Face inferior da placa
I	3,98	1,63	1,22	1,68
II	2,75	1,69	1,43	1,58
III	2,48	2,14	1,21	1,29
IV	2,75	2,33	1,30	1,42

*Caso II - a: Carga concentrada;

** Caso II – b: Carga uniformemente distribuída sobre a área de contato dos pneus.

▪ **Resultados teóricos x Resultados modelos unidimensionais:**

Para a Viga L ($l_1 = 5,00$ m), direção longitudinal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto (tensão de tração na face superior da placa), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 7,72%. Destaca-se o Modelo I, cujo resultado é o que apresenta maior diferença em relação ao resultado teórico; 19,12% e o Modelo IV, cujo resultado é o que se apresenta mais próximo ao resultado teórico; 0,80%. No Caso III – carga concentrada na borda (tensão de tração na face inferior da placa), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados, consideravelmente, inferiores aos resultados teóricos, em média 44,11%.

Para a Viga W ($l_2 = 2,50$ m), direção transversal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto (tensão de tração na face superior da placa), os Modelos I e II apresentam resultados 3,59% e 2,28% superiores aos respectivos resultados teóricos. O Modelo III apresenta resultados iguais e o Modelo IV apresenta resultado 1,20% inferior ao resultado teórico. No Caso III - carga concentrada na borda (tensão de tração na face inferior da placa), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores aos resultados teóricos, em média 43,34%.

No Caso I, observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), seja na direção longitudinal (Viga L) ou na direção transversal (Viga W), apresentam resultados muito próximos aos resultados teóricos. No Caso III, os resultados apresentados pelos quatro modelos analisados (I, II, III e IV), seja na direção longitudinal (Viga L) ou na direção transversal (Viga W), estão muito distantes dos resultados teóricos, ou melhor, são consideravelmente inferiores aos resultados teóricos. Ressalta-se que essas tendências foram verificadas anteriormente nas análises dos resultados dos momentos fletores máximos ($M_{máx}$).

Em relação aos resultados teóricos, destaca-se que para os três casos de carregamento analisados (I, II e III), o Modelo II ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 60,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores tensões de tração na flexão máximas e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta as menores tensões de tração na flexão máximas.

Agora, referindo-se aos resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais, na direção longitudinal (Viga L), avaliando-se os Caso I e III, observa-se que o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores tensões de tração na flexão máximas e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta as menores tensões de tração na flexão máximas. E, na direção transversal (Viga W), avaliando-se os Caos I e III, observa-se que o Modelo II ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 60,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores tensões de tração na flexão máximas e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta as menores tensões de tração na flexão máximas.

- **Resultados teóricos x Resultados modelos bidimensionais:**

No Caso I – carga concentrada no canto (tensão de tração na face superior da placa), observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam

resultados superiores aos resultados teóricos, em média 20,24%. Destaca-se o Modelo I, pois esse apresenta uma diferença elevada entre os valores comparados, da ordem de 58,57%. Os resultados apresentados pelos demais modelos analisados (II, III e IV) são satisfatórios.

No Caso II – a (carga concentrada) – carga concentrada no interior (tensão de tração na face inferior da placa), os Modelos I e II apresentam resultados 8,43% e 9,14% inferiores aos respectivos resultados teóricos. Já, os Modelos III e IV apresentam resultados 32,10% e 32,39% superiores aos respectivos resultados teóricos.

No Caso II – b (carga uniformemente distribuída sobre a área de contato do pneu) – carga concentrada no interior (tensão de tração na face inferior da placa), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores aos resultados teóricos, em média 26,51%. Destaca-se, novamente, o Modelo I que apresenta um resultado, aproximadamente, 31,46% inferior ao resultado teórico.

No Caso III – carga concentrada na borda (tensão de tração na face inferior da placa), os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados consideravelmente inferiores aos resultados teóricos, em média 60,88%.

Para os modelos bidimensionais, referindo-se a tensão de tração na flexão máxima, no Caso I, observa-se que o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) apresenta a maior tensão de tração na flexão máxima e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) apresenta a menor tensão de tração na flexão máxima. No Caso II – a, o Modelo IV ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 97,50$ MPa/m) apresenta a maior tensão de tração na flexão máxima e o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) apresenta a menor tensão de tração na flexão máxima. No Caso II – b, o Modelo II ($h = 20,00$ cm e $k_{inc} = 60,00$ MPa/m) apresenta a maior tensão de tração na flexão máxima e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) apresenta a menor tensão de tração na flexão máxima. E, por fim, no Caso III, o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) apresenta a maior tensão de tração na flexão máxima e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) apresenta a menor tensão de tração na flexão máxima.

▪ **Resultados modelos unidimensionais x Resultados modelos bidimensionais:**

Avaliando-se as tensões de tração na flexão máximas dos modelos unidimensionais na direção longitudinal (Viga L), no Caso I - carga concentrada no canto (tensão de tração na face superior da placa), observa-se que o Modelo II unidimensional é o único que apresenta resultado 3,51% superior ao resultado apresentado pelo Modelo II bidimensional. Os demais modelos unidimensionais analisados (I, III e IV) apresentam resultados 33,11%; 5,08% e 9,13% inferiores aos resultados dos respectivos modelos bidimensionais. Destaca-se o Modelo I, pois esse apresenta a maior diferença entre os valores comparados. Ainda na direção longitudinal (Viga L), no Caso III – carga concentrada na borda (tensão de tração na face inferior da placa), nota-se que os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados dos respectivos modelos bidimensionais, em média 29,95%.

Agora, avaliando-se as tensões de tração na flexão máximas dos modelos unidimensionais na direção transversal (Viga W), no Caso I - carga concentrada no canto (tensão de tração na face superior da placa), observa-se que os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos respectivos modelos bidimensionais, em média 18,62%. Destaca-se, mais uma vez, o Modelo I, visto que a diferença entre os valores das tensões de tração na flexão máximas dos modelos unidimensionais e bidimensionais chega a 53,08%. No Caso III – carga concentrada na borda (tensão de tração na face inferior da placa), novamente, os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados muito superiores aos resultados dos respectivos modelos bidimensionais, em média 30,95%.

A seguir, as Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 ilustram o comportamento dos modelos unidimensionais e bidimensionais analisados diante os resultados teóricos calculados neste estudo.

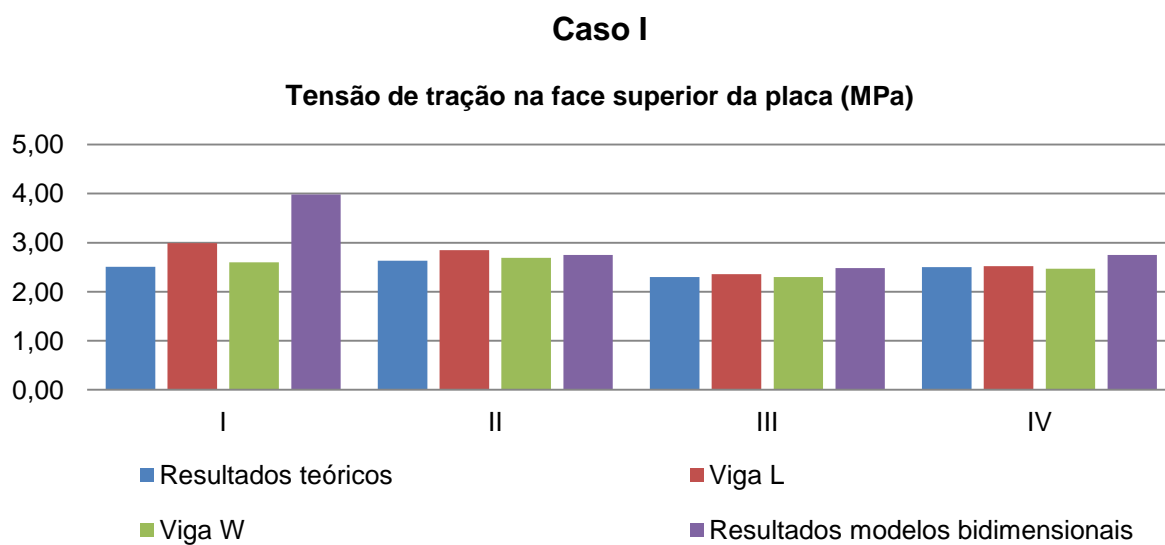


Figura 5.9 – Análise dos resultados – Tensão de tração na flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$): Caso I

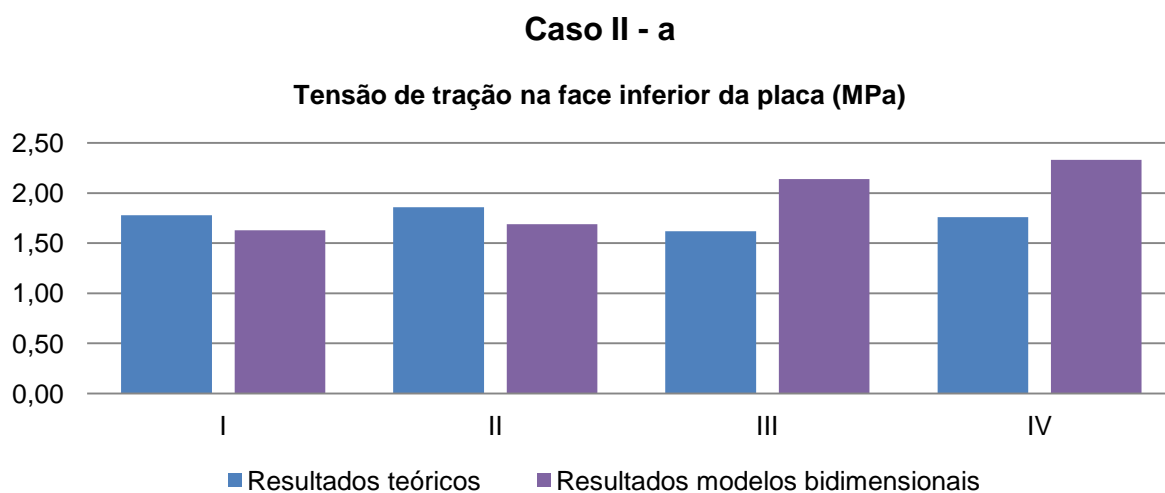


Figura 5.10 – Análise dos resultados – Tensão de tração na flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$): Caso II – a

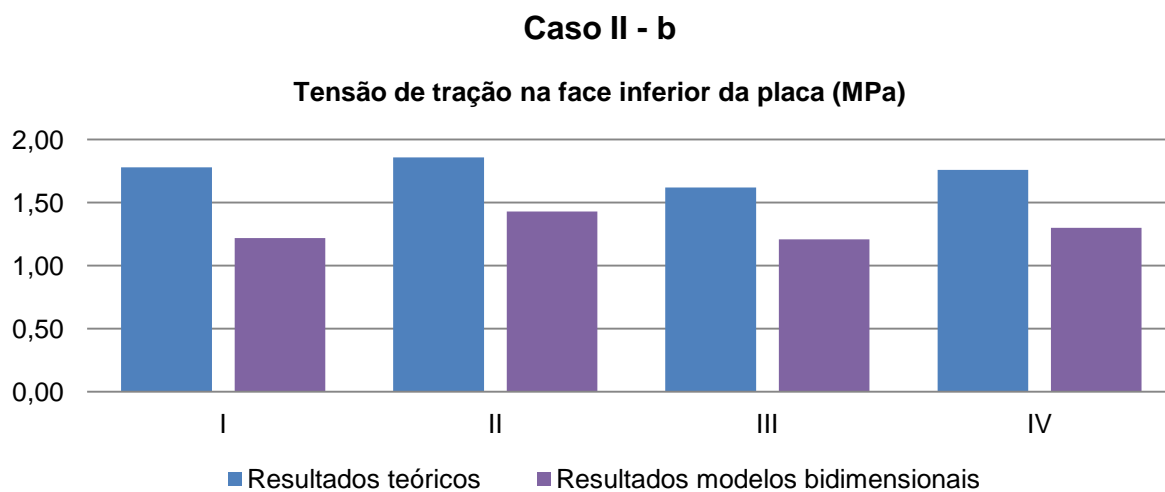


Figura 5.11 – Análise dos resultados – Tensão de tração na flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$): Caso II – b

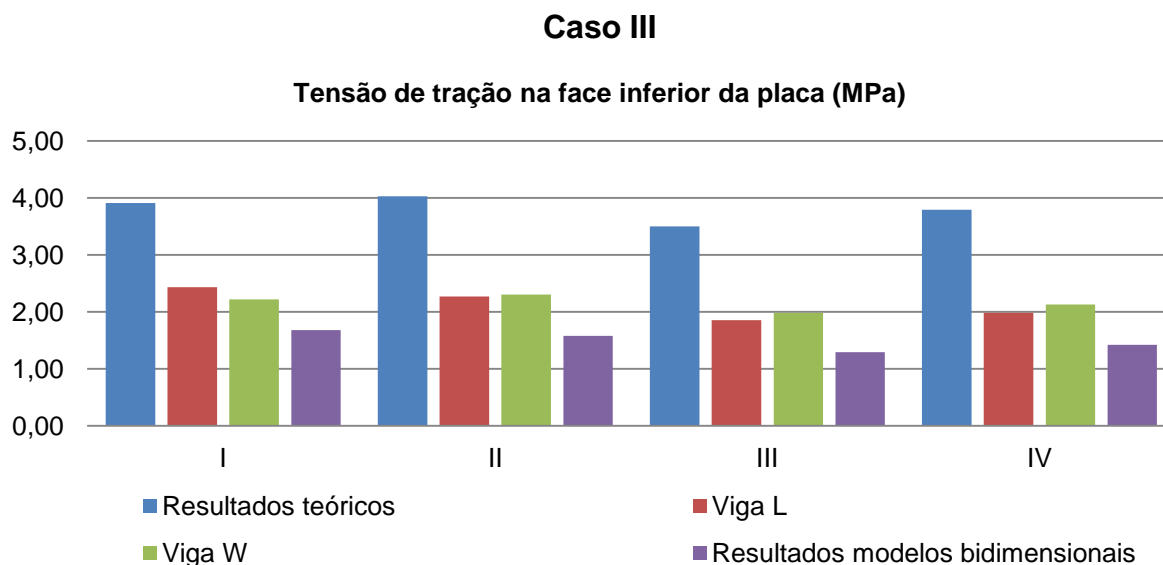


Figura 5.12 – Análise dos resultados – Tensão de tração na flexão ($\sigma_{m\acute{a}x}$): Caso III

Para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) no Caso I, unidimensionais e bidimensionais, todas as tensões de tração na flexão máximas apresentadas são superiores a tensão de tração na flexão admissível de projeto - σ_{adm} (igual a 2,07 MPa). No Caso II – a, apenas os Modelos III (igual a 2,14 MPa) e IV (igual a 2,33 MPa) apresentam resultados superiores à σ_{adm} . No Caso II – b, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores à σ_{adm} . E, por fim, no Caso III, os modelos unidimensionais analisados, na direção longitudinal da placa (Viga L), que apresentam resultados inferiores à σ_{adm} são os Modelos III (igual a 1,85 MPa) e IV (igual a 1,98 MPa). Na direção transversal da placa (Viga W), o Modelo III é o único modelo analisado que apresenta resultado inferior à σ_{adm} (igual a 1,98 MPa). Ainda, referindo-se ao Caso III, mas agora em relação aos modelos bidimensionais, observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores à σ_{adm} .

5.4.3 Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$)

5.4.3.1 Carregamento estático (semi- eixo) – Modelos analíticos de Westergaard

As Tabelas 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam, respectivamente, os resultados teóricos (calculados através das equações propostas pelos modelos analíticos de Westergaard com os parâmetros dos projetos estruturais), os resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais – vigas de concreto (*Ftool versão*

3.00) e os resultados obtidos através das análises dos modelos bidimensionais – placas de concreto (SAP 2.000 versão 14.2) das deflexões máximas ($\omega_{m\acute{a}x}$).

Tabela 5.20 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados teóricos

Modelo	Caso I	Caso II	Caso III
I	1,868	0,244	0,819
II	1,600	0,214	0,712
III	1,130	0,153	0,509
IV	1,223	0,167	0,553

Tabela 5.21 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados modelos unidimensionais

Viga L ($l_1 = 5,00$ m)	Modelo	Caso I	Caso III
	I	2,490	0,771
	II	1,880	0,563
	III	1,220	0,363
	IV	1,290	0,378
Viga W ($l_2 = 2,50$ m)	Modelo	Caso I	Caso III
	I	2,780	0,822
	II	1,990	0,590
	III	1,280	0,381
	IV	1,340	0,398

Tabela 5.22 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados modelos bidimensionais

Modelo	Caso I	Caso II – a*	Caso II – b**	Caso III
I	2,600	0,400	0,400	0,600
II	2,200	0,300	0,300	0,500
III	1,500	0,200	0,200	0,300
IV	1,700	0,200	0,200	0,300

*Caso II - a: Carga concentrada = Caso II;

** Caso II – b: Carga uniformemente distribuída sobre a área de contato dos pneus = Caso II.

▪ **Resultados teóricos x Resultados modelos unidimensionais:**

Para a Viga L ($l_1 = 5,00$ m), direção longitudinal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 16,06%. Destaca-se o Modelo I, cujo resultado é o que apresenta maior diferença em relação ao resultado teórico; 33,30% e o Modelo IV, cujo resultado é o

que se apresenta mais próximo ao resultado teórico, 5,48%. No Caso III – carga concentrada na borda, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados, consideravelmente, inferiores aos resultados teóricos, em média 21,78%. Novamente, destaca-se o Modelo I, pois apresenta a menor diferença entre os resultados comparados, na ordem de 5,86% e o Modelo IV, pois apresenta a maior diferença entre os resultados comparados, 31,65%.

Para a Viga W ($l_2 = 2,50$ m), direção transversal da placa de concreto, observa-se que, no Caso I – carga concentrada no canto, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 24,01%. Destaca-se o Modelo I, pois apresenta a maior diferença entre os resultados comparados, 48,82% e o Modelo IV, pois apresenta a menor diferença entre os resultados comparados, na ordem de 9,57%. No Caso III - carga concentrada na borda, o Modelo I é o único cujo resultado é 0,37% superior ao resultado teórico. Já, os demais modelos analisados (II, III e IV) apresentam resultados 17,13%; 25,15% e 28,03% inferiores aos respectivos resultados teóricos.

No tocante a deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$), ao se comparar os resultados teóricos com os respectivos resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais, nota-se um desequilíbrio entre os valores apresentados pelos modelos estruturais analisados (I, II, III e IV), por exemplo, para a mesma condição de carregamento (Caso I ou Caso III) há modelos cuja diferença entre os resultados são da ordem de 5,00%, enquanto para outros, essa diferença pode chegar a 30,00%.

Em relação aos resultados teóricos, destaca-se que para os três casos de carregamento analisados (I, II e III), o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores deflexões máximas e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta as menores deflexões máximas.

Quanto aos resultados obtidos através das análises dos modelos unidimensionais, tanto na direção longitudinal (Viga L) quanto na direção transversal (Viga W), avaliando-se os dois casos de carregamento (I e III), observa-se que o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores deflexões máximas e o Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) é o que apresenta as menores deflexões máximas.

▪ **Resultados teóricos x Resultados modelos bidimensionais:**

No Caso I – carga concentrada no canto, observa-se que os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados teóricos, em média 37,11%.

No Caso II – carga concentrada no interior, observa-se que os resultados apresentados pelos quatro modelos analisados (I, II, III e IV) são, em média; 38,65% superiores aos resultados teóricos. Destaca-se o Modelo I, pois apresenta uma diferença considerável entre os resultados comparados; 63,93% e o Modelo IV por apresentar a menor diferença entre os resultados comparados, na ordem de 19,76%.

No Caso III – carga concentrada na borda, os quatro modelos analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados inferiores aos respectivos resultados teóricos, em média 35,83%. Destaca-se o Modelo I que apresenta a menor diferença entre os resultados comparados; 26,74% e o Modelo IV que apresenta a maior diferença entre os resultados comparados; 45,75%.

Para os modelos bidimensionais, referindo-se a deflexão máxima, no Caso I, observa-se que o Modelo I ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 40,00$ MPa/m) é o que apresenta as maiores deflexões máximas para os três casos analisados de carregamento (I, II e III). O Modelo III ($h = 21,00$ cm e $k_{inc} = 100,00$ MPa/m) apresenta as menores deflexões máximas para os três casos de carregamento analisados (I, II e III), sendo que o mesmo apresenta valores iguais ao Modelo IV para os Casos II e III.

Segundo Rodrigues et al. (2006), conforme ilustrado anteriormente pela Tabela 5.2, quanto a deflexão máxima em placas isoladas de concreto sobre base elástica, sabe-se que a deflexão gerada pela carga posicionada na borda da placa (Caso III) é aproximadamente, o triplo da deflexão gerada pela mesma carga posicionada no interior da placa (Caso II) e que, a deflexão gerada pela carga posicionada no canto da placa (Caso I) é aproximadamente, sete vezes o valor da deflexão gerada pela mesma carga posicionada no interior da placa (Caso II).

Quanto aos resultados apresentados pelos quatro modelos bidimensionais analisados (I, II, III e IV), primeiramente, avalia-se a relação entre as deflexões máximas ($\omega_{m\acute{a}x}$) para os Casos III e II e, observa-se que os resultados apresentados no Caso III são, em média, 48,61% inferiores aos respectivos resultados esperados ($3,00 D_{II}$).

Agora, avalia-se a relação entre as deflexões máximas ($\omega_{m\acute{a}x}$) para os Casos I e II e, observa-se que o Modelo I é o único que apresenta resultado 7,14% inferior

ao resultado esperado ($7,00 D_{II}$) e os outros modelos analisados (II, III e IV) apresentam resultados 4,76%; 7,14% e 21,43% superiores aos resultados esperados ($7,00 D_{II}$).

▪ **Resultados modelos unidimensionais x Resultados modelos bidimensionais:**

Avaliando-se as deflexões máximas dos modelos unidimensionais na direção longitudinal (Viga L), para o Caso I - carga concentrada no canto, observa-se que para os quatro modelos analisados (I, II, III e IV), os resultados apresentados pelos modelos unidimensionais são inferiores aos respectivos resultados apresentados pelos modelos bidimensionais, em média 19,04%. Destaca-se o Modelo I por apresentar a menor diferença entre os resultados comparados, da ordem de 4,42% e o Modelo IV por apresentar a maior diferença entre o resultados comparados, 31,78%. Ainda na direção longitudinal (Viga L), para o Caso III – carga concentrada na borda, nota-se que os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) apresentam resultados superiores aos resultados dos respectivos modelos bidimensionais, em média 17,84%. Destaca-se o Modelo I, pois apresenta a maior diferença entre os resultados comparados; 22,18% e o Modelo II que apresenta a menor diferença entre os resultados comparados; 11,19%.

Agora, avalia-se as deflexões máximas dos modelos unidimensionais na direção transversal (Viga W), no Caso I - carga concentrada no canto, observa-se que o resultado apresentado pelo Modelo I unidimensional é 6,47% superior ao resultado apresentado pelo Modelo I bidimensional. Quanto aos demais modelos unidimensionais analisados (II, III e IV), esses apresentam resultados 10,55%; 17,19% e 26,87% inferiores aos resultados apresentados pelos respectivos modelos bidimensionais. No Caso III - carga concentrada na borda da placa, os quatro modelos unidimensionais analisados (I, II, III e IV) são 22,04% (em média) superiores aos respectivos resultados apresentados pelos modelos bidimensionais. Destaca-se o Modelo II, pois apresenta a menor diferença entre os resultados comparados, da ordem de 15,25%.

A seguir, as Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 ilustram o comportamento dos modelos unidimensionais e bidimensionais analisados diante os resultados teóricos calculados neste estudo.

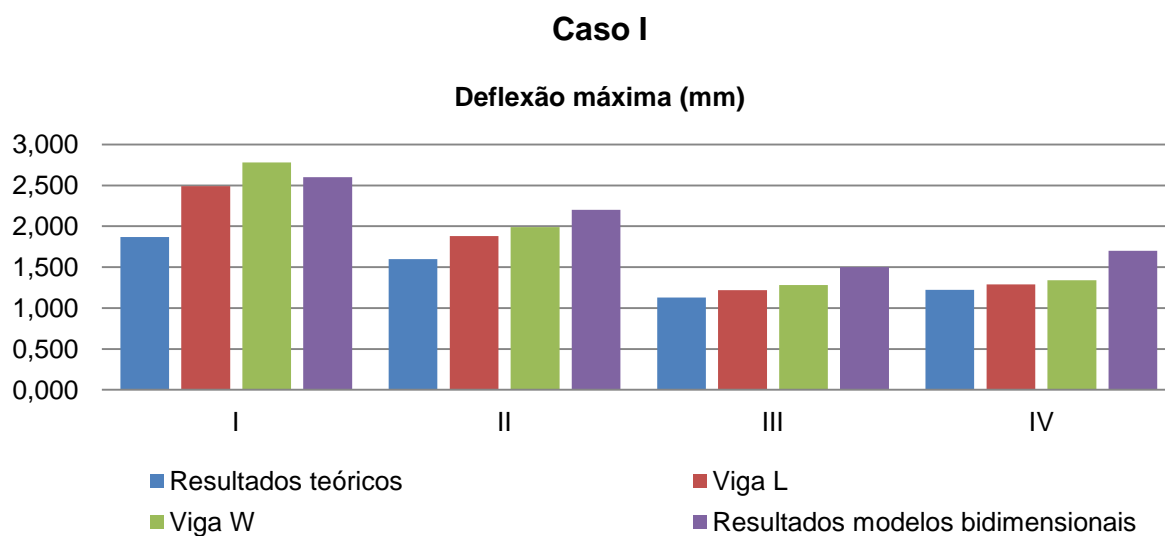


Figura 5.13 – Análise dos resultados – Deflexão ($\omega_{m\acute{a}x}$): Caso I

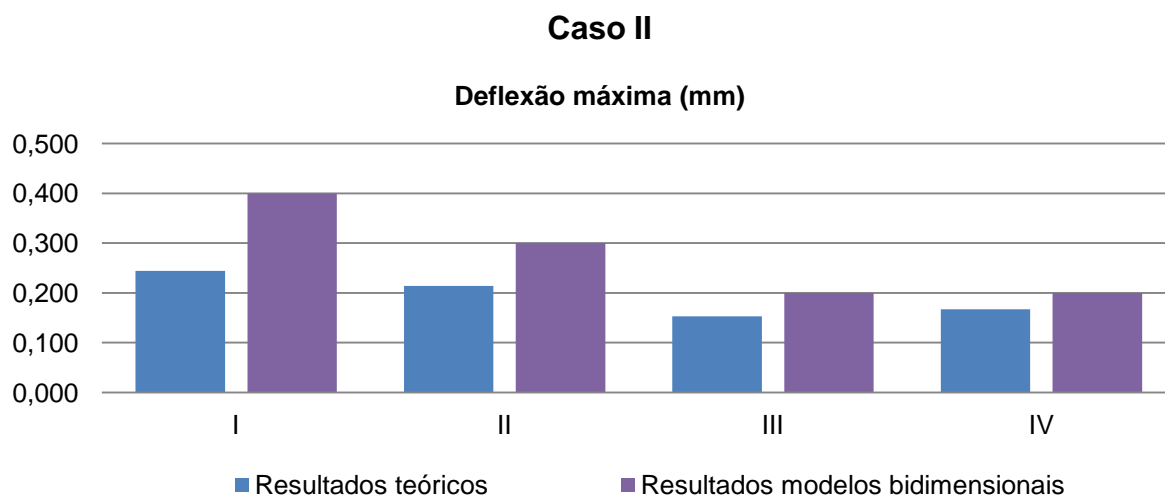


Figura 5.14 – Análise dos resultados – Deflexão ($\omega_{m\acute{a}x}$): Caso II

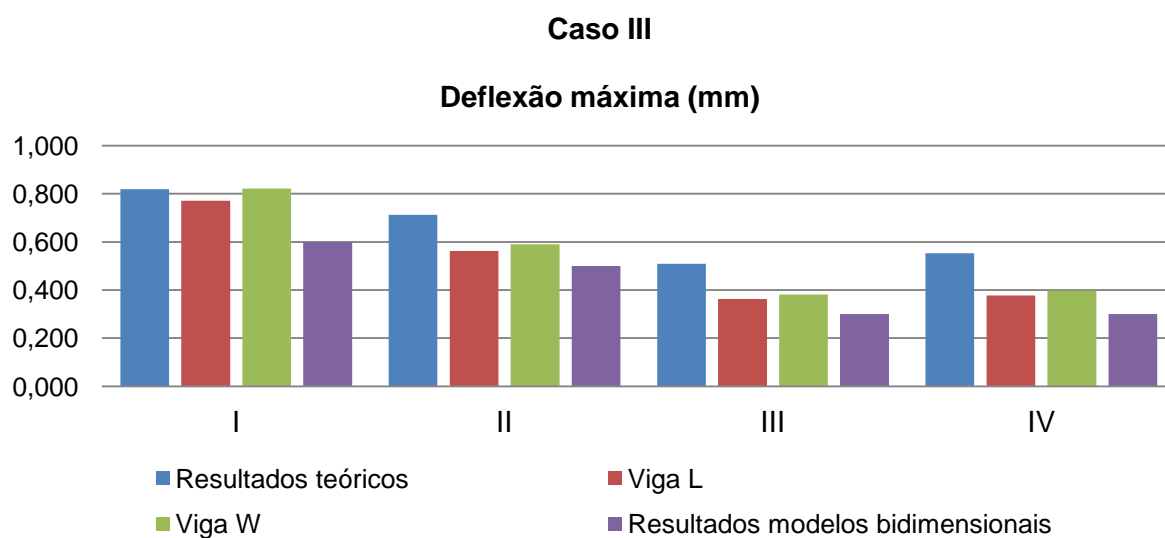


Figura 5.15 – Análise dos resultados – Deflexão ($\omega_{m\acute{a}x}$): Caso III

Observa-se que para todos os modelos bidimensionais analisados no Caso II (carga posicionada no interior da placa de concreto) as deflexões máximas calculadas estão na faixa de valores aceitáveis segundo a norma ABNT NBR 6.118/2007.

Por fim, segundo artigo técnico publicado na Revista Recuperar (setembro/outubro, 2006) e de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.8, estabelece-se como parâmetro para verificação do desempenho das juntas das placas de concreto analisadas nesse trabalho uma deflexão limite (ω_{junta}) equivalente a 0,250 milímetros e, comparando-a com os resultados apresentados pelos quatro modelos bidimensionais analisados (I, II, III e IV) no Caso III, conclui-se que todos são superiores a deflexão limite (ω_{junta}). Esse fato indica a possibilidade de ocorrer casos de deflexões excessivas nas regiões das juntas, o que é desfavorável para os requisitos segurança e durabilidade do piso industrial de concreto.