

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES DE CONCRETO REFORÇADAS COM COMPOSTOS EPÓXI/FIBRAS VEGETAIS

MARIANA DE CARVALHO SILVA VIEIRA¹, JESIEL CUNHA²

Resumo

Neste trabalho foram feitas simulações numéricas através do Método dos Elementos Finitos, para analisar a eficiência do Polímero Reforçado com Fibra Vegetal (PRFVeg) no reforço de lajes de concreto armado. Comparou-se o desempenho do mesmo com outros materiais compostos frequentemente utilizados na construção civil (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono - PRFC e Polímero Reforçado com Fibra de Vidro - PRFV). O PRFVeg mostra-se uma alternativa promissora, por ter menor custo e vantagens do ponto de vista ambiental. Apesar de ter propriedades mecânicas inferiores aos outros materiais, o que implica em maior quantidade de reforço para as peças, o PRFVeg apresentou bons resultados, sendo viável sua aplicação do ponto de vista estrutural.

Palavras-chave: simulação numérica, materiais compostos, fibra vegetal, reforço estrutural, lajes de concreto.

Abstract

In this paper, numerical simulations have been performed by using Finite Element Method, to analyze the efficiency of Plant Fiber Reinforced Polymer (PFRP) for strengthening concrete slabs. The performance of PFRP has been compared with other composite materials commonly used in civil engineering (i.e., Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP and Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP). As these ones are more expensive, PFRP is an interesting technique, due to lower cost and advantages for the environmental requirements. Although the inferior mechanical properties with respect to the other materials, which implies in greater amount of reinforcement in the parts, the PFRP shows good results and feasible application in the structural point of view.

Keywords: numerical simulation, composite materials, vegetal fiber, structural strengthening, reinforced concrete slabs.

1 - FECIV, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia - MG, CEP 38400-902 – marianacs@hotmail.com

2 - FECIV, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia - MG, CEP 38400-902 – jecunha@ufu.br

1 Introdução

Os materiais compostos são aqueles formados por dois ou mais materiais, cujas propriedades são combinadas e originam novas, com melhor desempenho. Possuem uma fase contínua, que é a matriz polimérica, e uma descontínua, que é o reforço, sendo que o tipo, a quantidade, a orientação e a posição deste é que determinam as propriedades do material. Devido principalmente às boas relações resistência e rigidez / peso, os materiais compostos são cada vez mais utilizados na Engenharia Civil, seja na recuperação ou na criação de estruturas (HOLLAWAY; HEAD, 2001, LOPEZ-ANIDO; NAIK, 2000, BURGOYNE, 1999, MOSALLAM, 2002).

Quando comparados aos materiais tradicionais da construção civil (concreto, aço e madeira), os materiais compostos destacam-se pelas qualidades estruturais e construtivas, como alta resistência e leveza, propriedades anti-corrosão, estabilidade dimensional, baixos custos de instalação e recuperação e modularidade (NETO; PARDINI, 2006, KIM, 1995, JONES, 1975).

As desvantagens do uso desses materiais são os custos elevados e a necessidade de especialização e mão-de-obra qualificada, além de existirem alguns aspectos do comportamento mecânico dos mesmos ainda pouco conhecidos. Porém, esses problemas estão sendo solucionados com investimentos em novas pesquisas e maior divulgação desses materiais e seus benefícios, permitindo o aumento do consumo e, conseqüentemente, a redução dos custos.

As principais causas da necessidade de reforço de estruturas são falhas de concepção e execução, e mudanças de projeto. Como exemplo pode citar-se a alteração no modo de utilização da edificação, o desgaste natural da estrutura, as falhas durante a elaboração dos projetos, como a falta de controle no limite de flechas, entre outras.

Os materiais compostos tem se mostrado muito eficientes no reforço de estruturas de concreto armado (lajes, vigas, pilares e paredes), pelo baixo peso e facilidade de aplicação.

O Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) é um dos materiais mais utilizados no reforço de estruturas, porém possui custo elevado. Sendo assim, têm sido estudados outros materiais, de menor custo e desempenho semelhante ao do PRFC, a fim de se encontrar uma alternativa para substituição do mesmo. Uma dessas é o Polímero Reforçado com Fibra Vegetal (PRFVeg), que possui vantagens tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental.

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a eficiência do PRFVeg no reforço de lajes em concreto armado, e comparar o desempenho do mesmo com o do PRFC e do PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), que também tem sido frequentemente utilizado na construção civil. Essas comparações ajudarão a verificar se o PRFVeg é viável para reforço do ponto de vista estrutural.

2 Construção do modelo numérico de laje reforçada

Neste estudo, o PRFVeg foi composto de fibra rami em matriz epóxi, sendo utilizado no formato de faixas, que são coladas na face tracionada das lajes, nas duas direções, de maneira similar à armação convencional com barras de aço. Escolheu-se utilizar as fibras em faixas por estas terem apresentado melhor aderência em relação a tecidos que cobrem toda a superfície da laje, de acordo com estudos anteriores (TENG et al., 2002).

Para realização das análises optou-se por um método numérico-computacional, pois simulações numéricas das peças reforçadas permitem variar com facilidade a geometria do reforço, os materiais, as condições de carregamento e de apoio, agilizando e simplificando a realização dos testes experimentais e reduzindo tempo e custos.

Foi escolhido o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é atualmente um dos mais importantes para se obter a solução aproximada de problemas físicos modelados através de equações diferenciais parciais (CHAVES, 2010). Ele fornece bons resultados e de forma rápida, além de ser uma excelente alternativa para problemas complexos, de difícil solução através de procedimentos tradicionais da matemática. É também econômico para os problemas em que a montagem e o ensaio de protótipos são onerosos.

O MEF constitui-se basicamente num processo de discretização, que visa a transformação de um problema em um número finito de incógnitas, dividindo-se o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas denominadas elementos (CHAVES, 2010). Isso depende do tipo de análise, da precisão desejada, e do tipo de problema: se é unidimensional, bidimensional ou tridimensional.

Utilizou-se o programa de elementos finitos ANSYS® para as simulações numéricas e, para cada elemento constituinte do modelo de laje reforçada (concreto, aço e fibra) adotou-se um elemento diferente do programa. Para as faixas de fibra vegetal, utilizou-se o SHELL63, elemento bidimensional de casca, que possui 4 nós e 6 graus de liberdade em cada nó (três rotações e três translações). Este elemento pode ser visto na Figura 1, juntamente com o modelo do reforço.

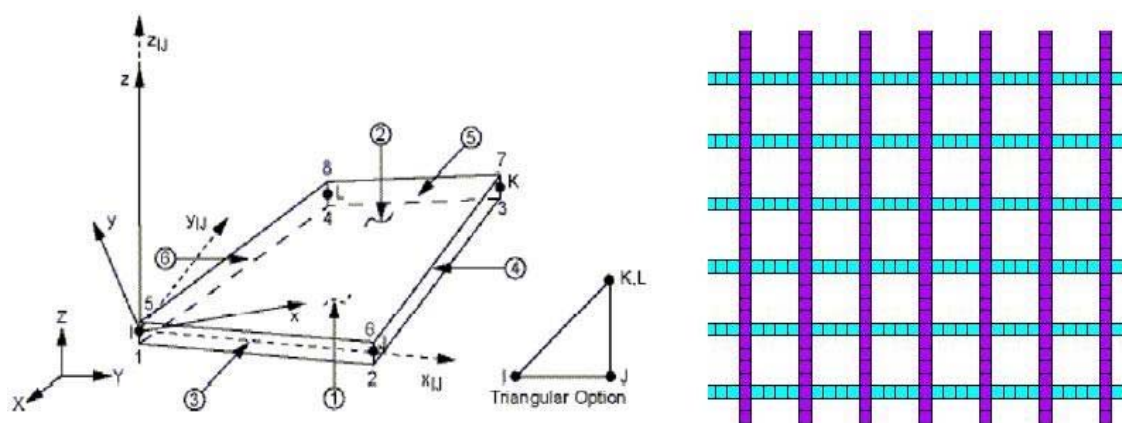


Figura 1 - Elemento SHELL63 e malha gerada para o PRFVeg. Fonte: ANSYS (2009).

Para o concreto, utilizou-se o SOLID45, que é o elemento tridimensional básico do ANSYS®. Ele possui 8 nós, com três graus de liberdade (três translações) em cada nó. O mesmo pode ser visto na Figura 2, juntamente com o modelo da laje.

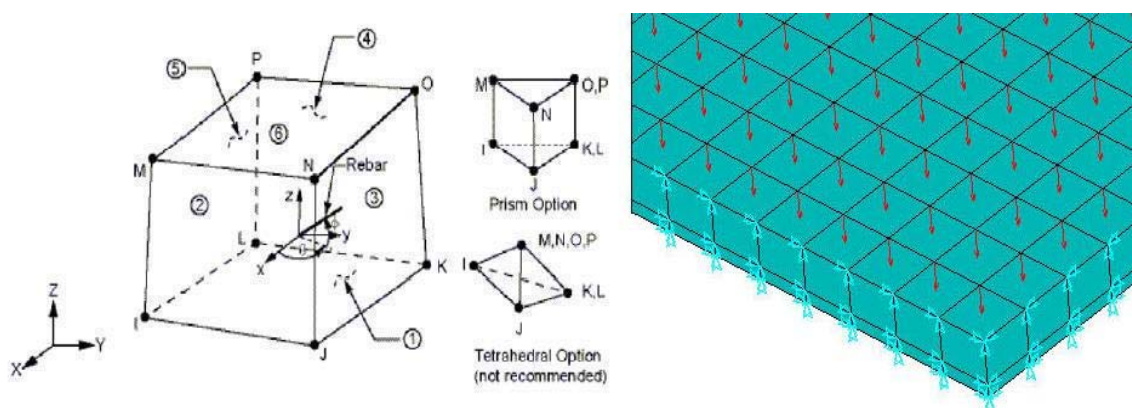


Figura 2 - Elemento SOLID45 e malha gerada para o concreto, com carregamento e condições de apoio. Fonte: ANSYS (2009).

Por fim, para o aço (armaduras), adotou-se o elemento BEAM3, que é unidimensional e possui 2 nós, com três graus de liberdade em cada nó (duas translações e uma rotação), conforme mostra a Figura 3.

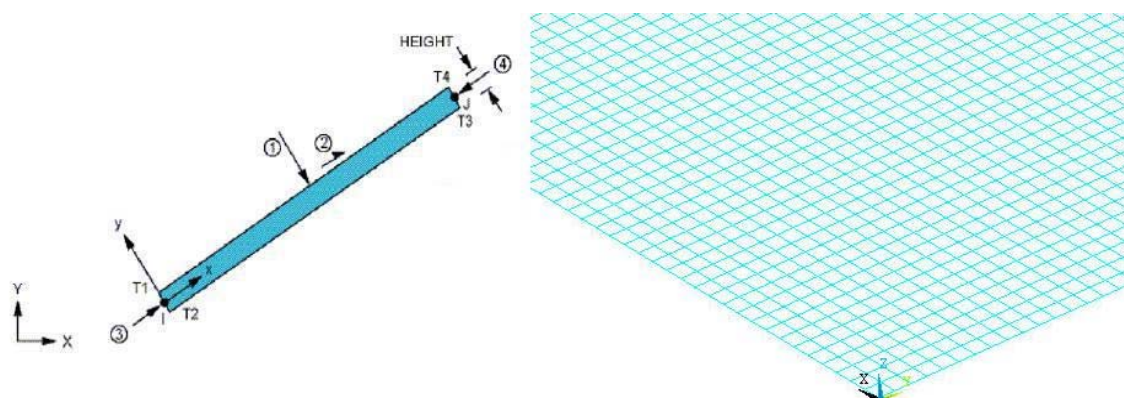


Figura 3 - Elemento BEAM3 e malha gerada para as armaduras. Fonte: ANSYS (2009).

No ANSYS[®] se faz necessária a definição das características dos materiais, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, as características geométricas, como a área da seção transversal e a inércia das barras, o carregamento e as condições de apoio (CUNHA, 2008). Para o concreto com $f_{ck} = 25$ MPa, definiu-se as seguintes características:

- Módulo de elasticidade: $E_c = 2,38 \times 10^{10}$ N/m²;
- Coeficiente de Poisson: $\nu_c = 0,2$.

Para o aço CA60, tem-se:

- Módulo de elasticidade: $E_s = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$;
- Barra de 5 mm: Área = $1,963 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Inércia = $3,068 \times 10^{-11} \text{ m}^4$
- Barra de 6,3 mm: Área = $3,1172 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Inércia = $7,7327 \times 10^{-11} \text{ m}^4$
- Barra de 10 mm: Área = $7,8839 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Inércia = $4,9087 \times 10^{-10} \text{ m}^4$

Por fim, para o PRFVeg (fibra rami em matriz epóxi), definiu-se:

- Largura da faixa de reforço: 0,10 m;
- Espessura da faixa de reforço: 0,003 m;
- Módulo de elasticidade: $E_f = 3,635 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$;
- Coeficiente de Poisson: $\nu_f = 0,27$.

Para este material tem-se os seguintes limites:

- Deformação ε_f não maior que 3%;
- Tensão normal de tração σ_f não superior a $4,5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

3 Lajes reforçadas simuladas

Para a análise da eficiência do PRFVeg no reforço de estruturas de concreto armado, este foi aplicado em três tipos diferentes de lajes, cujas armaduras e condições de apoio podem ser vistas nas Figuras 4, 5 e 6. Como já foi dito anteriormente, as faixas de reforço foram coladas na face tracionada das lajes, ou seja, na face inferior para as lajes 1 e 2 e na superior para a laje 3. Na laje 2 colou-se apenas na parte inferior, pois, dependendo do tipo de utilização da laje, a face superior pode ser de difícil acesso e execução do reforço.

O procedimento de cálculo e aplicação do reforço no aumento da capacidade de carga das lajes foi de mudar o carregamento original a que as mesmas estavam sujeitas para valores superiores.

As características geométricas e os carregamentos inicial e final de cada laje encontram-se na Tabela 1.

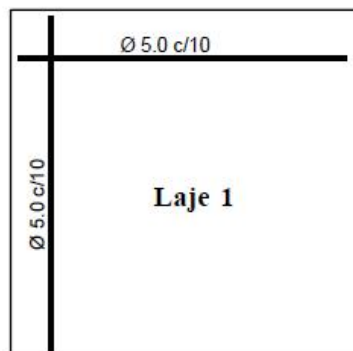


Figura 4 - Laje apoiada nos quatro bordos. Fonte: Chaves (2010).

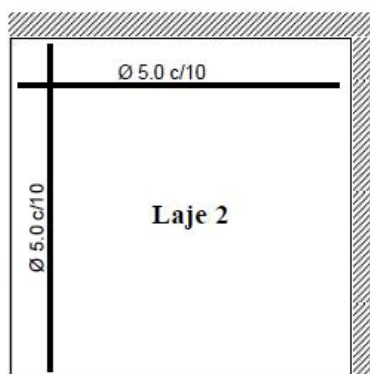


Figura 5 - Laje apoiada/engastada. Fonte: Chaves (2010).

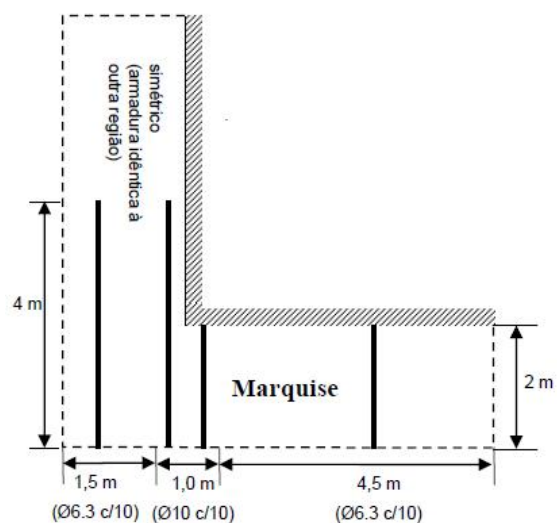


Figura 6 - Marquise. Fonte: Chaves (2010).

Tabela 1 - Características geométricas e carregamentos das lajes.

	Espessura (m)	Altura útil (m)	Carregamento (N/m ²)
Laje 1	0,10	0,08	de 7.000 para 15.000
Laje 2	0,10	0,08	de 7.000 para 19.000
Laje 3 (marquise)	0,10	0,08	de 4.000 para 8.500

4 Dimensionamento da área de reforço para a laje apoiada nos quatro bordos (laje 1)

Para o dimensionamento do reforço das lajes, considerou-se para o modelo de laje reforçada os mesmos conceitos de dimensionamento da laje sem reforço, ou seja, ela foi dimensionada do modo padrão para as seções de concreto armado à flexão no ELU, porém introduzindo-se o PRFVeg, que atuará no combate à tração juntamente com a armadura da peça (CHAVES, 2010). Como não foi possível descarregar totalmente a peça, houve deformações iniciais em decorrência do carregamento remanescente. Os diagramas de equilíbrio para o ELU podem ser vistos na Figura 7.

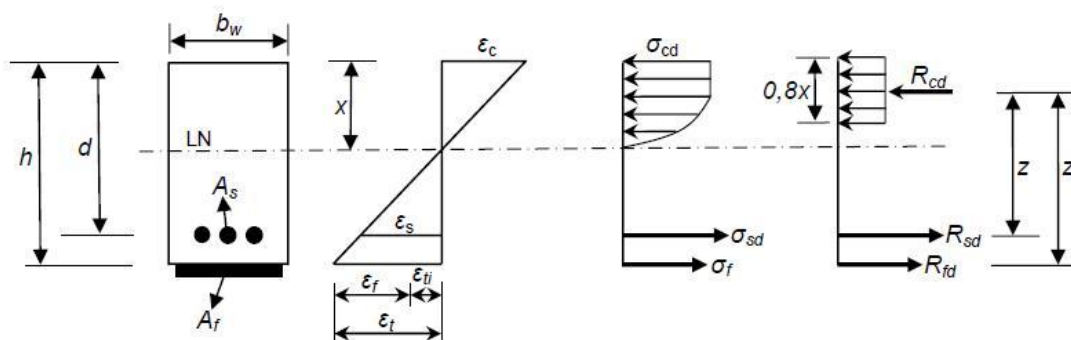


Figura 7 - Diagramas de equilíbrio para dimensionamento no Estado Limite Último com reforço em PRFVeg. Fonte: Chaves (2010).

As condições para o equilíbrio são:

$$M_d = R_{cd} \times z \rightarrow M_d = b_w \times 0,85 \times f_{cd} \times 0,8x \times (d - 0,4x) \quad (1)$$

$$M_d = R_{sd} \times z + R_{fd} \times z_1 \rightarrow M_d = A_s \times f_{yd} \times (d - 0,4x) + A_f \times \sigma_f \times (d - 0,4x) \quad (2)$$

Em relação à laje 1, os valores de momento fletor de cálculo (M_d) e área de aço (A_s) para o carregamento inicial foram de $9.058 \text{ N}\times\text{m}$ e $2,28\times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$, respectivamente, obtidos através do *software* ARMACON (2010). Primeiramente, a fim de se determinar a deformação total e a inicial do aço (ε_{ti} e ε_{si}), realizou-se um alívio de carga para a execução do reforço, de $7.000 \text{ N}/\text{m}^2$ para $4.000 \text{ N}/\text{m}^2$, o que fez com que o momento passasse para $5.180 \text{ N}\times\text{m}$. Assim, aplicou-se esses valores na equação (1) para determinação da posição da linha neutra (x) nesta situação, considerando $b_w = 1,00 \text{ m}$. Obteve-se $x = 0,0055 \text{ m}$.

De posse desse valor, calculou-se a resultante de cálculo à compressão do concreto, através da equação (3).

$$R_{cd} = 0,85 \times b_w \times f_{cd} \times (0,8x) \quad (3)$$

$$R_{cd} = 66.790 \text{ N}$$

Assim, determinou-se a tensão de cálculo no aço, através da equação (4), admitindo $R_{sd} = R_{cd}$.

$$\sigma_{sd} = \frac{R_{sd}}{A_s} \quad (4)$$

$$\sigma_{sd} = 2,929 \times 10^8 \text{ N}/\text{m}^2$$

Então, foram determinadas a deformação inicial do aço e a deformação total inicial, através das equações (5) e (6), respectivamente.

$$\varepsilon_{si} = \frac{\sigma_{sd}}{E_s} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{si} = 1,4\text{‰}$$

$$\varepsilon_{ti} = \varepsilon_{si} \times \frac{(h-x)}{(d-x)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ti} = 1,8\text{‰}$$

Posteriormente, a fim de se determinar as condições de operação da laje quando submetida ao carregamento final e a área de reforço (A_f) a ser utilizada, determinou-se, também através do ARMACON, o valor de momento fletor de cálculo para essa situação, que foi de $19.404 \text{ N}\times\text{m}$.

Novamente através da equação (1), a posição da linha neutra resultou em $x = 0,0225$ m. Admitindo-se concreto a 2‰, determinou-se a deformação do aço através da equação (7).

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = \frac{(d-x)}{x} \quad (7)$$

$$\varepsilon_s = 5,1‰$$

Com a deformação do aço, determinou-se a deformação total através da equação (8).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s \times \frac{(h-x)}{(d-x)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = 6,9‰$$

Para encontrar a deformação e a tensão no reforço utilizou-se as equações (9) e (10).

$$\varepsilon_f = \varepsilon_t - \varepsilon_{ii} \quad (9)$$

$$\varepsilon_f = 5,1‰$$

$$\sigma_f = E_f \times \varepsilon_f \quad (10)$$

$$\sigma_f = 1,854 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Por fim, para determinar a área de reforço, utilizou-se a equação (2) de equilíbrio, porém acrescida de dois coeficientes de redução do reforço, transformando-se na equação (11). Estes coeficientes são: ϕ , que foi obtido através da expressão (12) e ψ_f , que por recomendação da ACI tem valor de 0,85 (CHAVES, 2010). Como $\varepsilon_s = 0,0069 > 0,005$, $\phi = 0,90$.

$$M_d = \phi \times [A_s \times f_{yd} \times (d - 0,4x) + A_f \times \sigma_f \times \psi_f \times (h - 0,4x)] \quad (11)$$

$$A_f = 9,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

$$\phi = \begin{cases} 0,90, se \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,70 + \frac{0,20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}}, se \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,70, se \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (12)$$

Dividindo-se a área de reforço encontrada pela espessura das faixas (e), de 0,003 m, tem-se a quantidade das mesmas que serão necessárias por metro (L), conforme mostra a expressão (13).

$$L = \frac{A_f}{e} \quad (13)$$

$$L = 0,3048 \text{ m/m} \approx 0,30 \text{ m/m}$$

Assim, adotou-se 15 faixas em cada direção da laje, distribuídas de modo convencional e com espaçamento de 0,20 m entre as mesmas, conforme mostra a Figura 8.

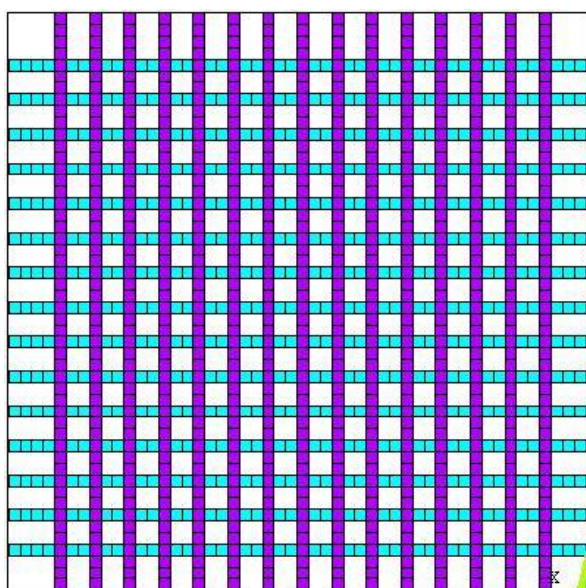


Figura 8 - Reforço distribuído na laje 1.

5 Dimensionamento da área de reforço para a laje apoiada/engastada (laje 2)

Realizou-se o mesmo processo já descrito para a laje 1. Os valores obtidos pelo ARMACON de momento fletor de cálculo e área de aço para o carregamento inicial foram de 9.058 N×m e

$1,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$, respectivamente. Após o alívio de carga, que foi o mesmo realizado para a laje 1 (de $7.000 \text{ N}/\text{m}^2$ para $4.000 \text{ N}/\text{m}^2$), o momento passou para $3.500 \text{ N}\times\text{m}$. Aplicou-se novamente as equações (1) e de (3) a (6) e obteve-se $\varepsilon_{si} = 1,4\%$ e $\varepsilon_{ti} = 1,8\%$.

Para a determinação das condições de operação da laje quando submetida ao carregamento final e a área de reforço, o valor de momento fletor de cálculo encontrado foi de $16.632 \text{ N}\times\text{m}$ e, através da equação (1), obteve-se a posição da linha neutra para essa situação, que resultou em $x = 0,0189 \text{ m}$. Assim, admitindo-se novamente concreto a 2% e aplicando-se as equações de (7) a (12), obteve-se $A_f = 6,56 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$ e, através da equação (13), $L = 0,2186 \text{ m}/\text{m}$, arredondado para $0,20 \text{ m}/\text{m}$. Adotou-se 8 faixas de reforço espaçadas de $0,40 \text{ m}$ em cada direção, distribuídas do modo convencional para esse tipo de laje, conforme mostra a Figura 9.

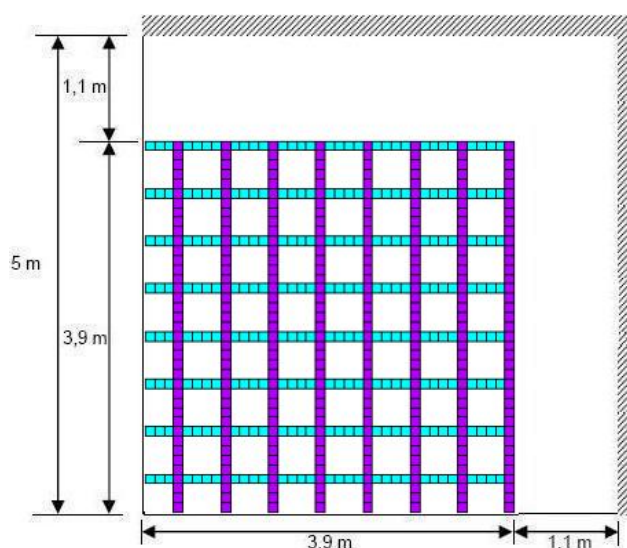


Figura 9 - Reforço distribuído na laje 2.

6 Dimensionamento da área de reforço para a marquise (laje 3)

Para a marquise não se utilizou o ARMACON para determinação de momentos fletores e áreas de aço, e sim as fórmulas tradicionais, conforme mostram as equações (14), (15) e (16), além da tabela de valores característicos para flexão simples em peças retangulares. Para o carregamento inicial, obteve-se o momento característico através da equação (14) e o valor de k pela equação (15).

$$M_{sk} = \frac{q \times L^2}{2} \quad (14)$$

$$M_{sk} = 8.000 \text{ N} \times \text{m}$$

$$k = \frac{d}{\sqrt{\frac{M_{sk}}{b_w \times f_{ck}}}} \quad (15)$$

$$k = 4,47$$

Interpolando-se valores de α na tabela para este valor de k , obteve-se $\alpha = 34,73$, adotando-se $\alpha = 35$. Por fim, obteve-se a área de aço através da equação (16):

$$A_s = \frac{M_{sk}}{\alpha \times d} \quad (16)$$

$$A_s = 2,86 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$$

O alívio de carga realizado foi de 4.000 N/m^2 para 3.500 N/m^2 e, após o mesmo, o momento característico resultou em $7.000 \text{ N} \times \text{m}$, conforme a equação (14). Transformando-se este em valor de cálculo, aplicou-se novamente as equações (1) e de (3) a (6) e obteve-se $\varepsilon_{si} = 2,17\%$ e $\varepsilon_{ti} = 2,79\%$.

Para a situação de carregamento final, o valor de momento fletor de cálculo encontrado foi de $23.800 \text{ N} \times \text{m}$. Através da equação (1) obteve-se a posição da linha neutra para essa situação, que resultou em $x = 0,0286 \text{ m}$. Assim, admitindo-se o concreto a $3,5 \%$ e aplicando-se as equações de (7) a (12), obteve-se uma área de reforço $A_f = 9,97 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$ e, através da equação (13), $L = 0,3323 \text{ m/m}$, arredondado para $0,30 \text{ m/m}$. Adotou-se 25 faixas de reforço em cada direção, distribuídas de forma similar ao modo convencional de distribuição de barras de aço para este tipo de laje (Figura 6). Assim, próximo ao canto houve reforço a cada $0,10 \text{ m}$, enquanto no restante, a cada $0,20 \text{ m}$. Essa distribuição pode ser vista na Figura 10.

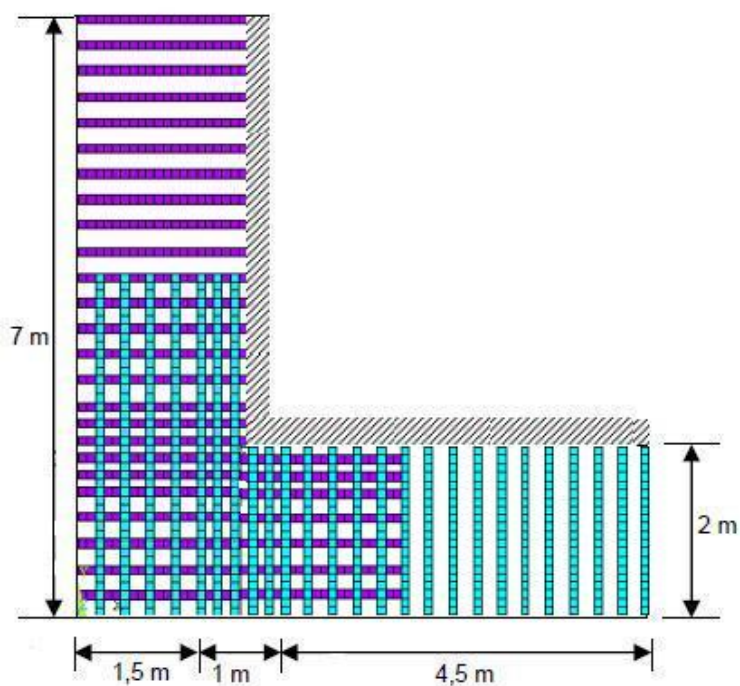


Figura 10 - Reforço distribuído na marquise.

7 Resultados das simulações

A seguir tem-se os resultados dos deslocamentos em Z (flechas), das tensões normais (σ_x) e das tensões de Von Mises (σ_{vm}) para as lajes nos seguintes casos: sem reforço, reforçada com PRFVeg e reforçada com PRFC, este último com mesmas largura, espessura e quantidade de faixas do PRFVeg, para critério de comparação dos dois materiais. Para a laje 1 tem-se as Figuras 11, 12, 13 e Tabela 2. Para a laje 2, as Figuras 14, 15, 16 e Tabela 3 e, por fim, para a laje 3, as Figuras 17, 18, 19 e Tabela 4. Os valores das flechas permitem avaliar a rigidez das peças, enquanto as tensões são parâmetros de avaliação da resistência das lajes.

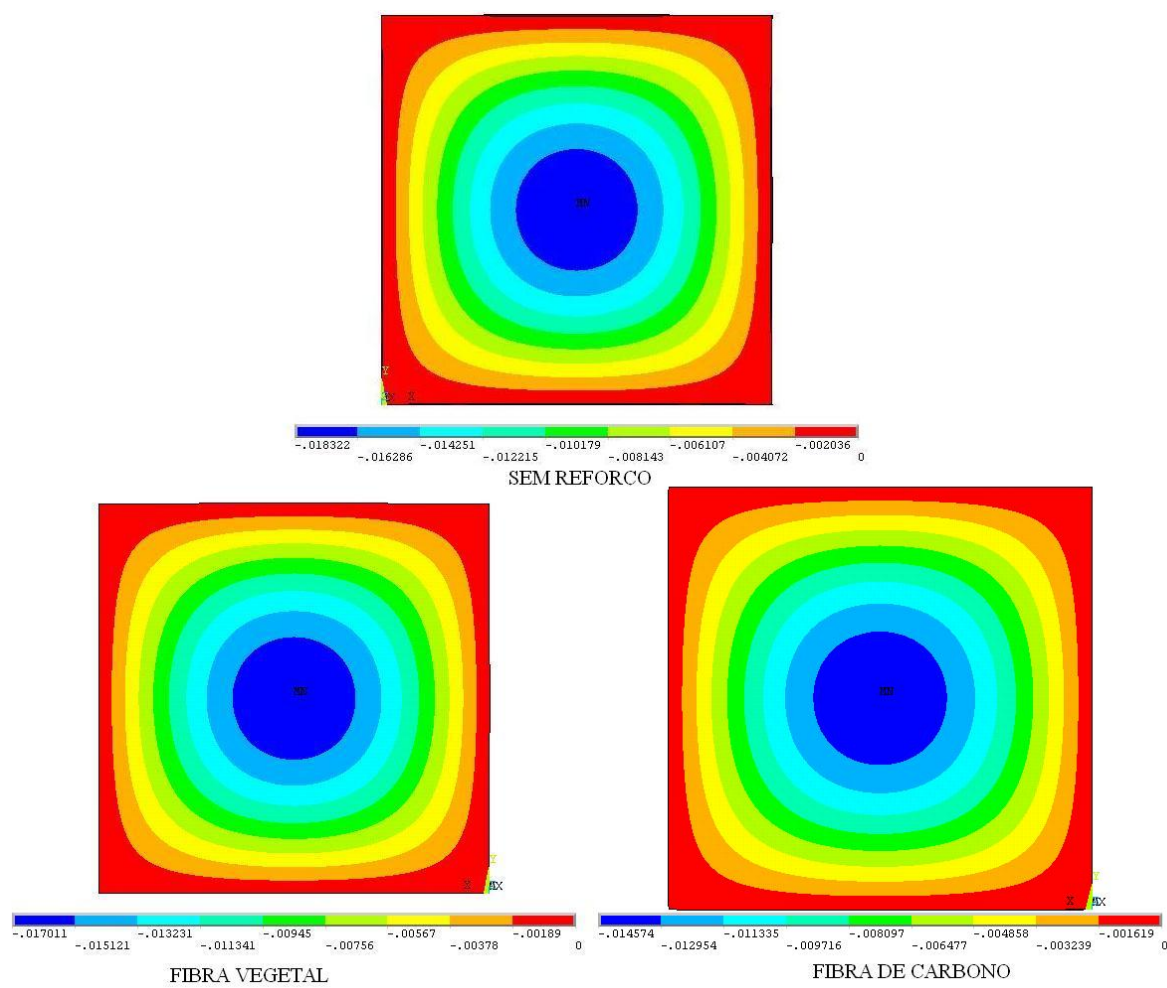


Figura 11 - Flechas obtidas para a laje 1 (m).

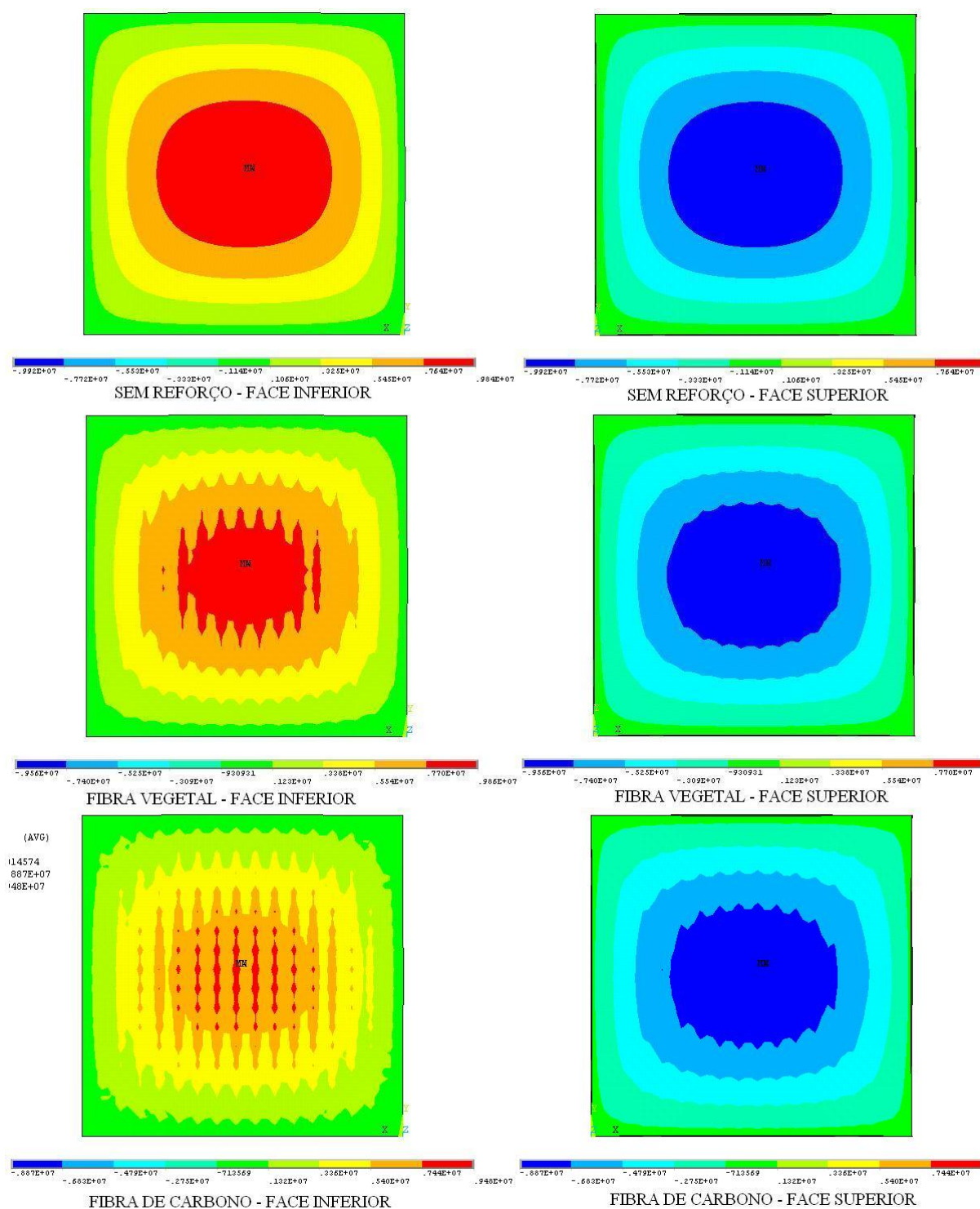


Figura 12 - Tensões normais σ_x referentes à laje 1 (N/m^2).

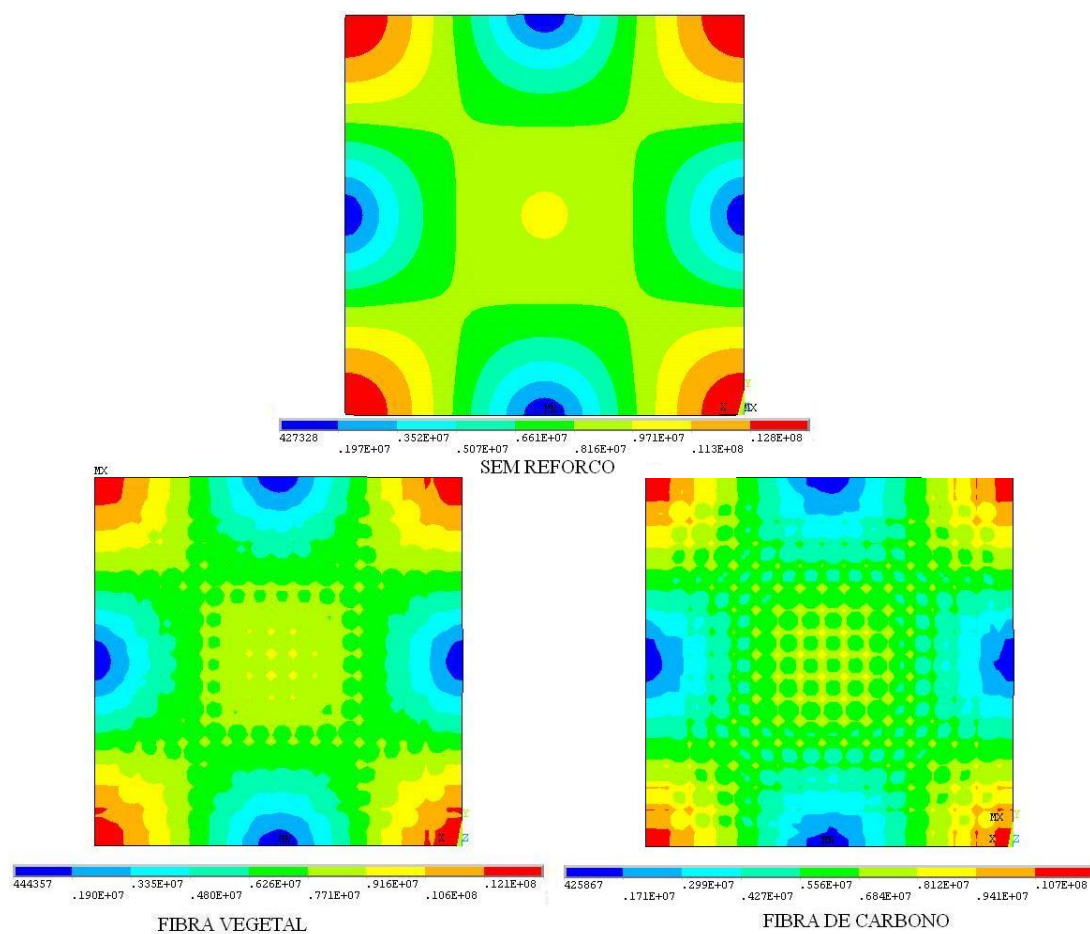


Figura 13 - Tensões de Von Mises referentes à laje 1 na face inferior (N/m²).

Tabela 2 - Resultados para a laje 1.

Laje 1	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x = \sigma_y$ (x 10 ⁶ N/m ²)		σ_{vm} (x 10 ⁶ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (2.4,2.4,0) Face inferior	Ponto (2.4,2.4,0.1) Face superior	Ponto (2.4,2.4,0) Face inferior	Ponto (2.4,2.4,0.1) Face superior		
Sem reforço	-	9,81	-9,89	9,81	9,88	0,01832	-
Fibra vegetal (E _f = 3,635×10 ¹⁰ N/m ²)	0,003	8,43	-9,34	8,46	9,2	0,01701	15
Fibra de carbono (E = 1,55×10 ¹¹ N/m ²)	0,003	6,32	-8,39	6,35	8,15	0,01458	15

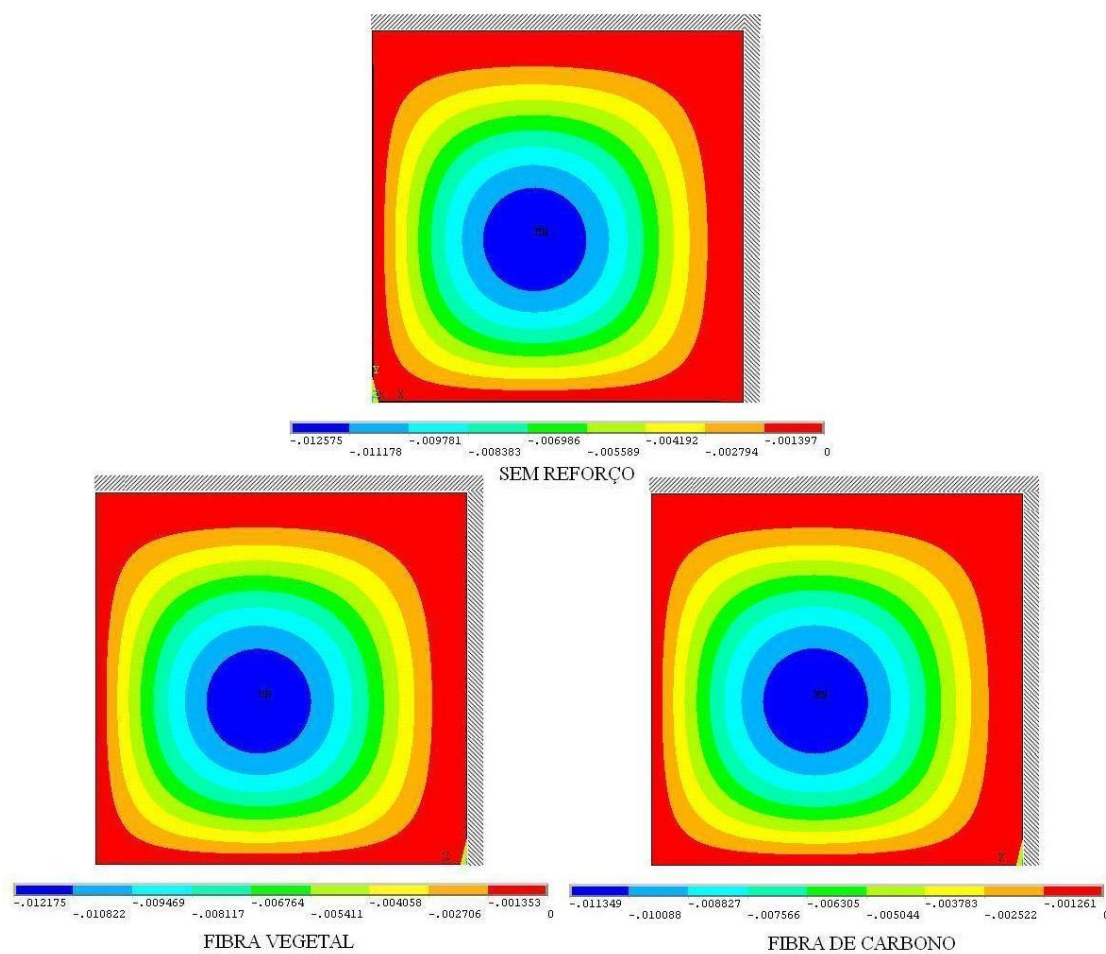


Figura 14 - Flechas obtidas para a laje 2 (m).

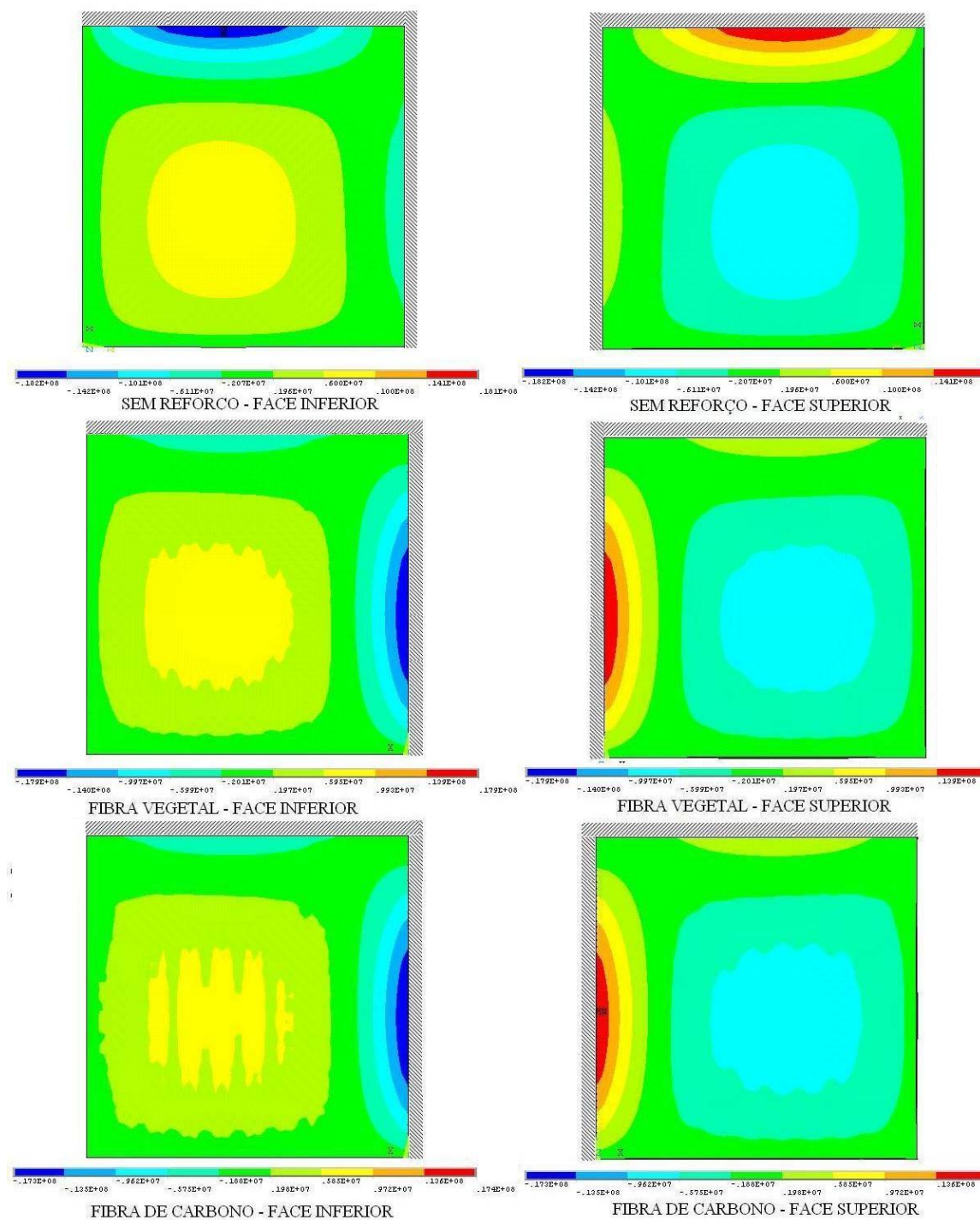


Figura 15 - Tensões normais σ_x referentes à laje 2 (N/m^2).

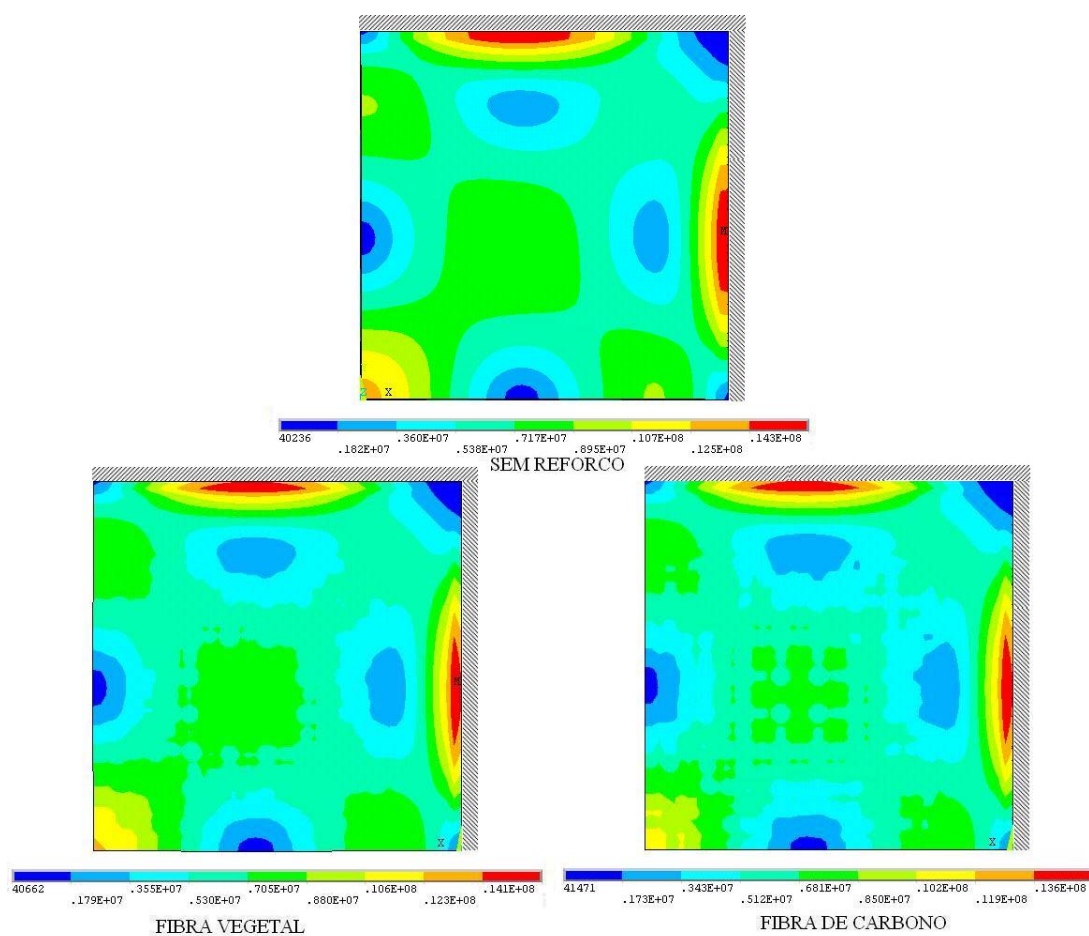


Figura 16 - Tensões de Von Mises referentes à laje 2 na face inferior (N/m²).

Tabela 3 - Resultados para a laje 2.

Laje 2	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x = \sigma_y$ ($\times 10^6$ N/m ²)		σ_{vm} ($\times 10^6$ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior	Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior		
Sem reforço	-	8,45	- 8,53	8,46	8,53	0,01258	-
Fibra vegetal ($E_f = 3,635 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,003	7,46	-8,15	7,48	8,06	0,01218	6,24
Fibra de carbono ($E = 1,55 \times 10^{11}$ N/m ²)	0,003	5,98	-7,52	6,02	7,36	0,01135	6,24

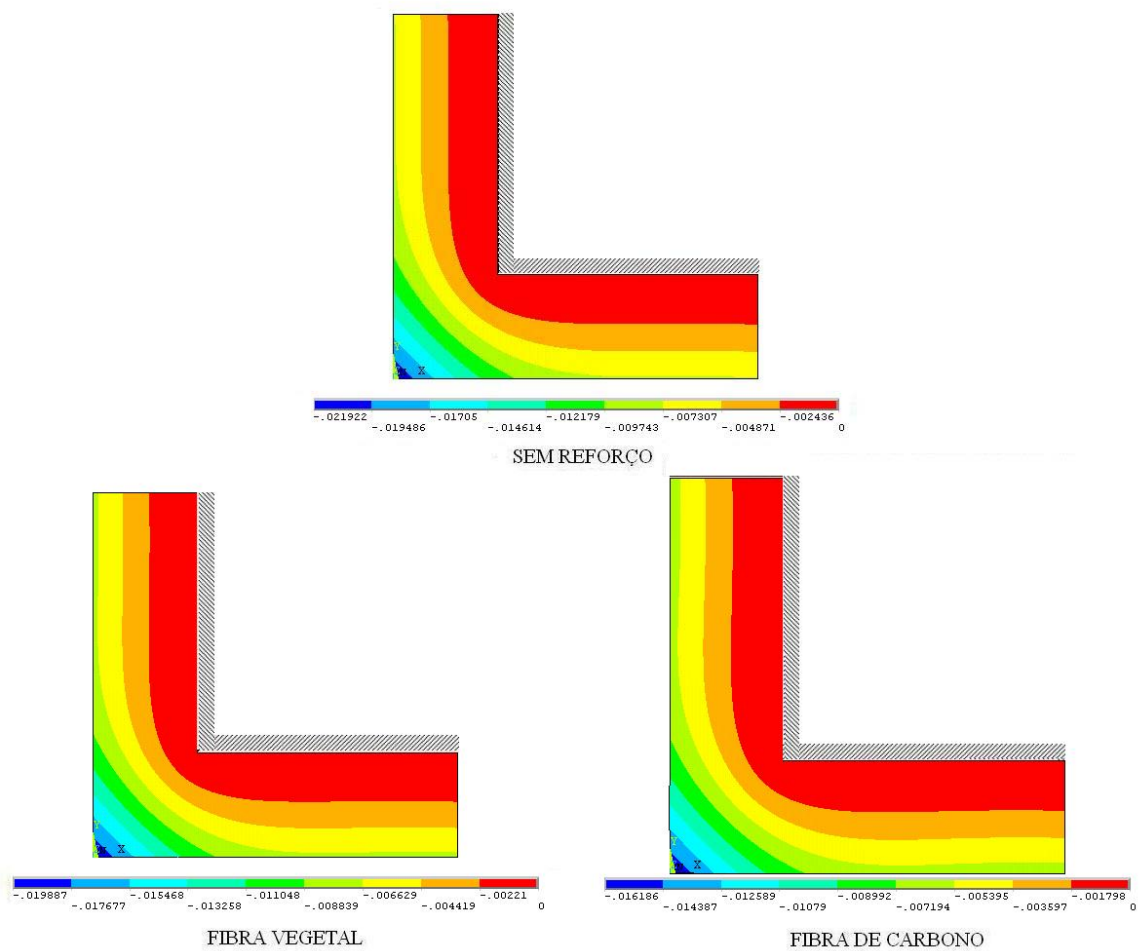


Figura 17 - Flechas obtidas para a laje 3 (m).

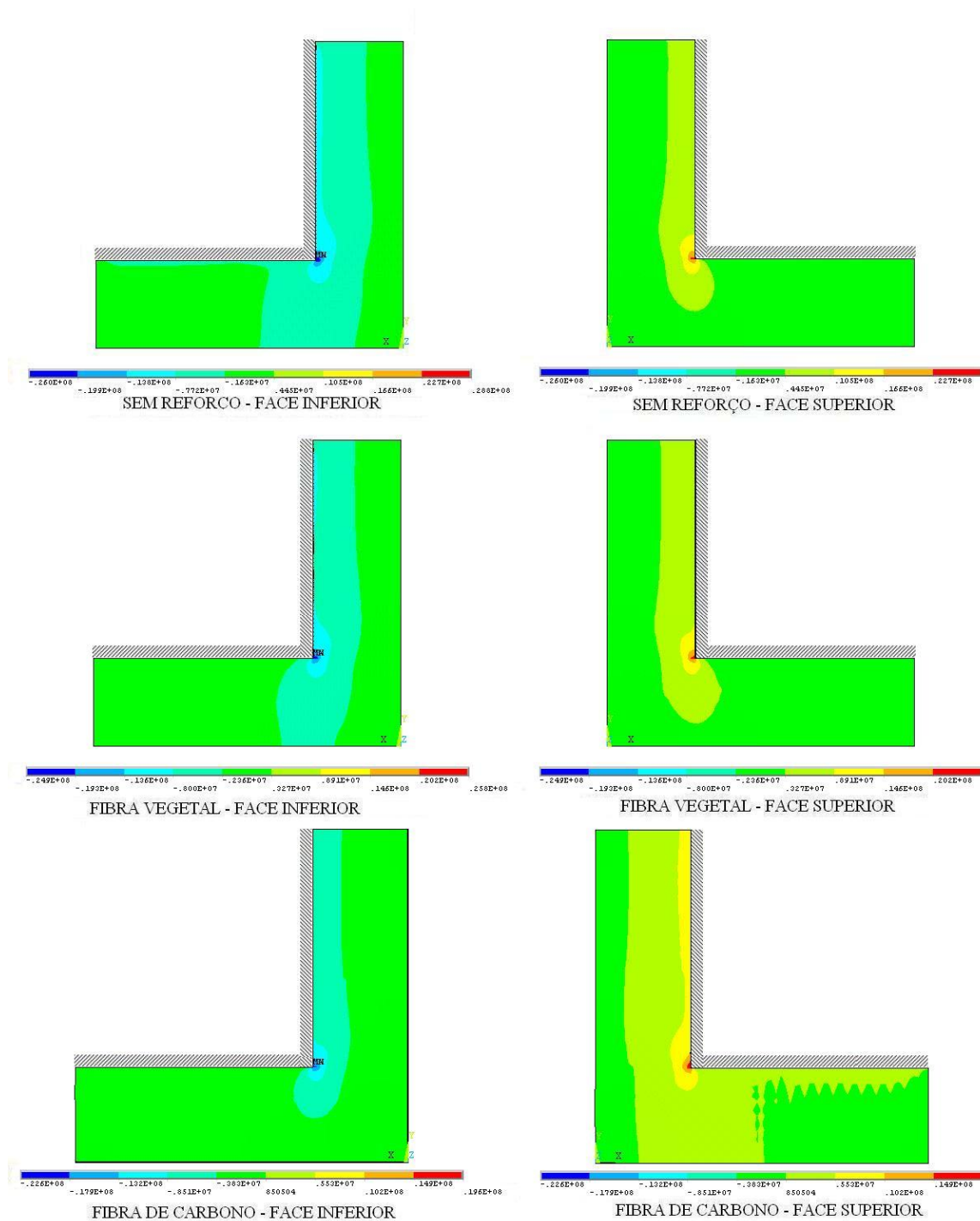


Figura 18 - Tensões normais σ_x referentes à laje 3 (N/m²).

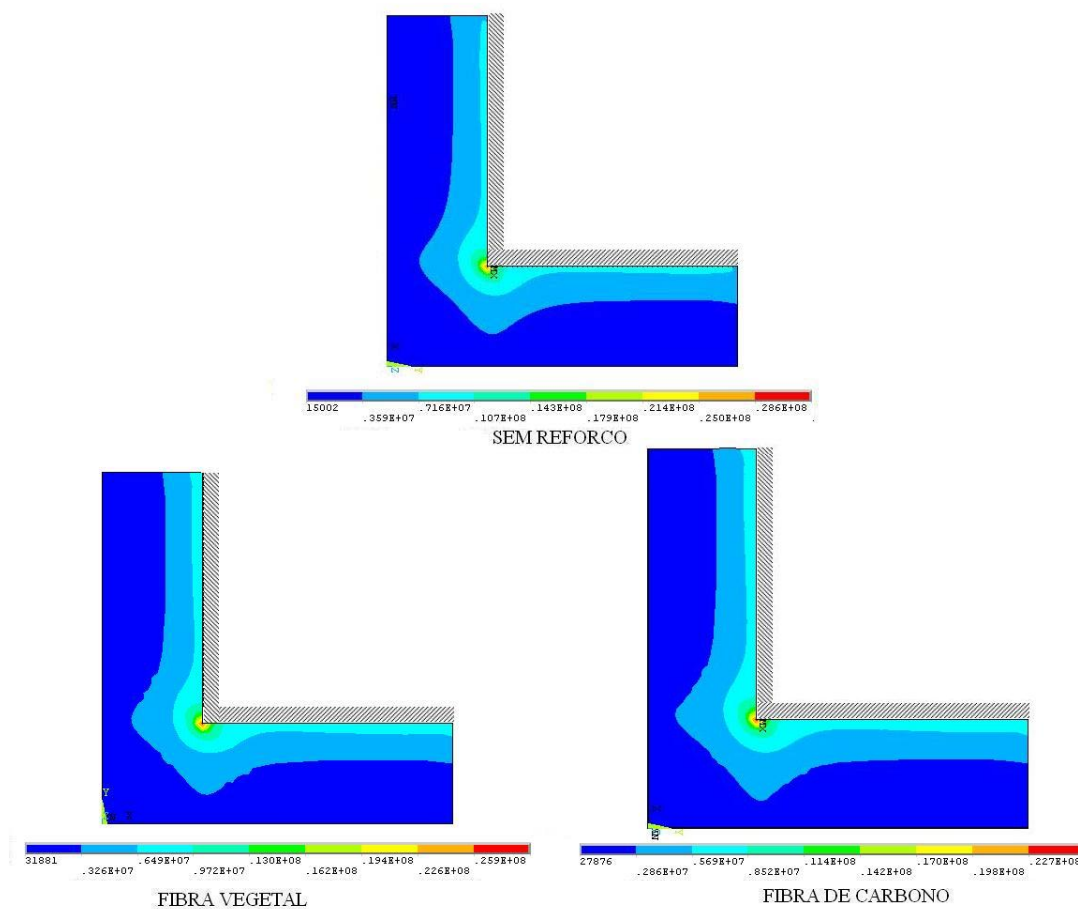


Figura 19 - Tensões de Von Mises referentes à laje 3 (N/m²).

Tabela 4 - Resultados para a laje 3.

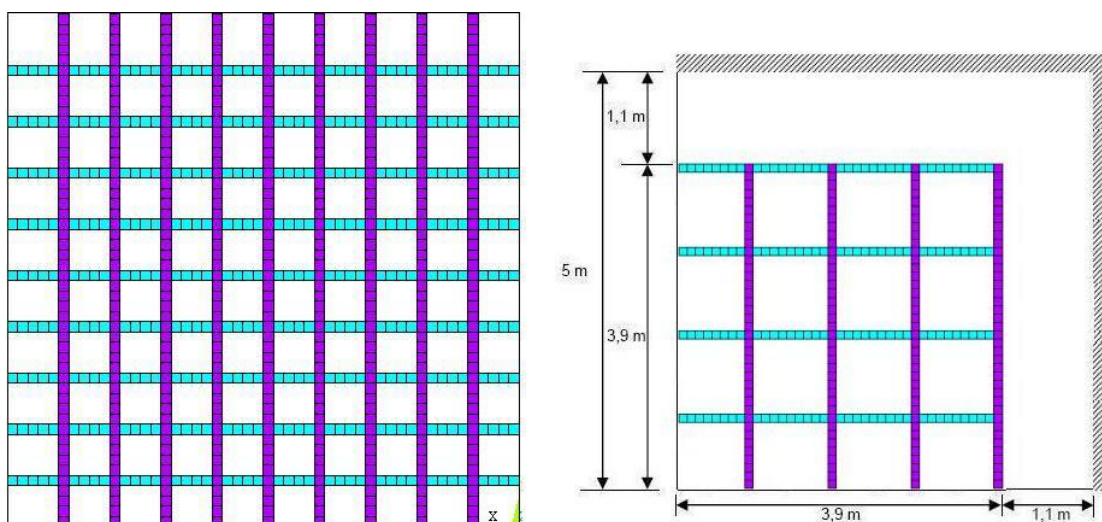
Laje 3	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x = \sigma_y$ ($\times 10^6$ N/m ²)		σ_{vm} ($\times 10^6$ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior	Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior		
Sem reforço	-	15,53	- 14,15	17,39	16,15	0,02193	-
Fibra vegetal ($E_f = 3,635 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,003	13,37	-13,22	14,98	15,02	0,01989	12,8
Fibra de carbono ($E = 1,55 \times 10^{11}$ N/m ²)	0,003	9,52	-11,53	10,77	13,06	0,01619	12,8

Analisando-se os resultados, observou-se que as lajes reforçadas com PRFVeg apresentaram tensões e flechas máximas inferiores às sem reforço, indicando ganhos de resistência e rigidez. Porém, o PRFC apresentou melhor desempenho, com tensões e flechas menores. Isso ocorre basicamente devido ao módulo de elasticidade deste ser cerca de 4 vezes maior que o do PRFVeg.

8 Comparação do PRFVeg com PRFC e PRFV

Chaves (2010) dimensionou áreas de reforço para as mesmas lajes utilizando PRFC, com largura também de 0,10 m, porém espessura de 0,0012 m, que é a padrão para este tipo de reforço. Como o módulo de elasticidade do PRFC é maior do que o do PRFVeg, a área necessária foi menor, e a disposição das faixas para cada laje pode ser vista na Figura 20.

Visando diminuir a quantidade utilizada de PRFVeg, estudou-se uma alternativa onde mantém-se a área e a distribuição de faixas de PRFC adotadas por Chaves (2010), e adota-se uma espessura maior para as faixas, para que os resultados sejam praticamente os mesmos. Este procedimento também foi realizado para o PRFV, que possui módulo de elasticidade intermediário ao do PRFC e PRFVeg. As espessuras escolhidas e os resultados obtidos podem ser vistos nas Tabelas 5, 6 e 7 para as lajes 1, 2 e 3.



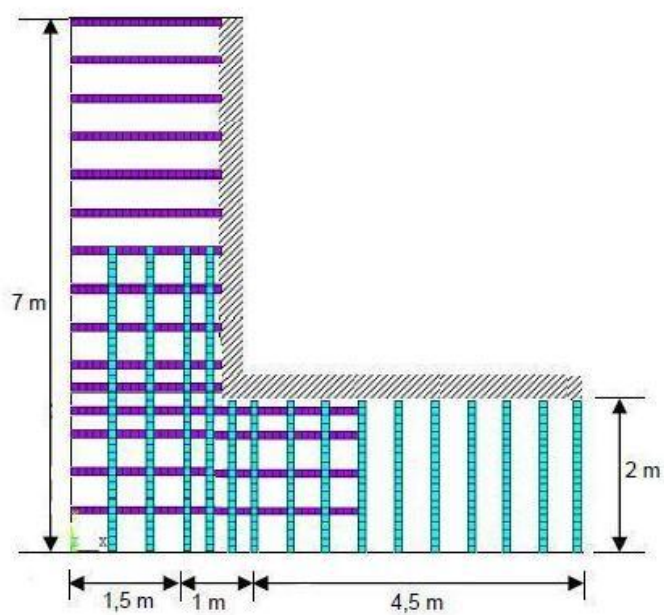


Figura 20 - Disposição de faixas de PRFC nas lajes.

Tabela 5 - Resultados para a laje 1.

Laje 1	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x = \sigma_y$ ($\times 10^6$ N/m ²)		σ_{vm} ($\times 10^6$ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior	Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior		
Fibra de carbono ($E = 1,55 \times 10^{11}$ N/m ²)	0,0012	8,05	-9,16	8,07	9,01	0,01707	9
Fibra vegetal ($E_f = 3,635 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0050	8,08	-9,17	8,1	9,03	0,0171	9
Fibra de vidro ($E_f = 5,5 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0033	8,07	-9,17	8,08	9,02	0,01709	9

Tabela 6 - Resultados para a laje 2.

Laje 2	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x=\sigma_y$ ($\times 10^6$ N/m ²)		σ_{vm} ($\times 10^6$ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior	Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior		
Fibra de carbono ($E_f = 1,55 \times 10^{11}$ N/m ²)	0,0012	7,14	-8,01	7,15	7,90	0,01227	3,12
Fibra vegetal ($E_f = 3,635 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0050	7,16	-8,02	7,17	7,91	0,01228	3,12
Fibra de vidro ($E_f = 5,5 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0033	7,15	-8,02	7,16	7,91	0,01227	3,12

Tabela 7 - Resultados para a laje 3.

Laje 3	Espessura da fibra (m)	$\sigma_x=\sigma_y$ ($\times 10^6$ N/m ²)		σ_{vm} ($\times 10^6$ N/m ²)		Flecha máxima (m)	Área de reforço (m ²)
		Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior	Ponto (1.9,1.9,0) Face inferior	Ponto (1.9,1.9,0.1) Face superior		
Fibra de carbono ($E_f = 1,55 \times 10^{11}$ N/m ²)	0,0012	12,32	-12,73	13,91	14,68	0,01988	7,6
Fibra vegetal ($E_f = 3,635 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0051	12,33	-12,73	13,92	14,69	0,01988	7,6
Fibra de vidro ($E_f = 5,5 \times 10^{10}$ N/m ²)	0,0034	12,29	-12,72	13,88	14,67	0,01985	7,6

As espessuras obtidas foram de, em média, 5 mm para o PRFVeg e 0,0034 m para o PRFV. Para o PRFVeg a espessura obtida é viável tanto para fabricação quanto para aplicação na estrutura. Comparando-se os resultados, percebe-se que, quanto menores os módulos de elasticidade,

maiores devem ser as espessuras para que o resultado seja equivalente ao do PRFC dimensionado por Chaves (2010).

9 Conclusões

As simulações numéricas realizadas permitiram a obtenção e análise dos resultados com economia de tempo e custos e facilidade na alteração da geometria, das condições de apoio e dos parâmetros definidos para os componentes do modelo de laje reforçada.

Os materiais compostos, no geral, apresentaram bom desempenho no reforço de lajes de concreto armado, reduzindo significativamente as tensões atuantes e, conseqüentemente, aumentando a resistência das mesmas.

O PRFVeg, em particular, apresentou desempenho satisfatório no reforço das lajes, porém tem propriedades inferiores ao PRFC e ao PRFV, ou seja, são necessárias mais faixas de reforço por metro para uma mesma finalidade, ou maiores espessuras das faixas para uma mesma área de reforço. No entanto, esta maior quantidade de material do PRFVeg pode ser compensada pelo menor custo e vantagens sobre a questão ambiental que a fibra vegetal apresenta.

10 Referências bibliográficas

ANSYS 11.0 Notice. Computational Applications and System Integration Inc., 2009.

ARMACON. Sistema de Dimensionamento de Peças Isoladas em Concreto Armado. Versão Acadêmica 1.3, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BURGOYNE, C.J. Advanced composites in civil engineering in Europe. Structural Engineering International, Zurich, v. 9, n. 4, 1999.

CHAVES, L. P. Estudo da distribuição do reforço de lajes de concreto armado com fibras de carbono, usando otimização topológica. 122 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

CUNHA, J. Curso básico do programa de elementos finitos ANSYS®. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, 2008. 92 p. Apostila.

HOLLAWAY, L.C.; HEAD, P.R. Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure. Elsevier Science, Amsterdam & London, 2001.

JONES, R.M. Mechanics of composite materials. Washington: Mcgraw-Hill Kogakusha, 1975.

KIM, D.H. Composite structures for civil and architectural engineering. Cambridge: E&FN SPON, 1995.

LOPEZ-ANIDO, R.A.; NAIK, T.R. Emerging materials for civil infrastructure - state of the art, American Society of Civil Engineers - ASCE, 2000.

MOSALLAM, A.S. Polymer composites: architectural and civil construction materials for the 21st century. Anais da Conferência Internacional de Compósitos na Arquitetura e Construção Civil - Arquimacom 2002, São Paulo, 2002.

NETO, F.L.; PARDINI, L.C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

TEICHMANN, L.N. Armacon: sistema de dimensionamento de peças isoladas em concreto armado. Versão Acadêmica 1.2, 2009.

TENG, J.G.; CHEN J.F.; SMITH, S.T.; LAM, L. FRP strengthened RC structures. London: John Wiley & Sons, 2002.

