

# Influência da Densidade do Núcleo na Rigidez do Pannel *Sandwich*

Vitor Dacol

vitor\_dacol@yahoo.com.br

<http://lattes.cnpq.br/1496884292345007>

MBA em Projeto, Execução e Controle de Estruturas e Fundações

Instituto de Pós-Graduação - IPOG

Florianópolis, SC, 31 de Julho de 2014

## *Resumo*

*O presente trabalho trata da influência da variação da densidade do material utilizado como núcleo na rigidez mecânica de um painel sandwich. Neste estudo, serão comparadas as tensões atuantes nas faces e núcleo dos painéis bem como a deflexão da peça estrutural, em função da mudança de densidade do material do núcleo. Os resultados dos ensaios foram obtidos através de análise estática com a aplicação do método de elementos finitos e, então, comparados entre si. Pelo estudo realizado, pode-se comprovar a influência da densidade do núcleo na capacidade mecânica do painel sandwich, estabelecendo, no entanto, que para variações limitas desta densidade não provocam alterações significativas naquele desempenho mecânico do painel. Os estudos foram conduzidos de forma a limitar a análise na faixa de regime elástico-linear da estrutura.*

*Palavras-chave:* Compósito. Sandwich. Laminado. Análise Estrutural. Mecânica.

## 1. Introdução

As placas chamadas sandwich são um tipo particular de laminado, sendo compostas por 3 (três) itens principais: 2 (duas) camadas externas, finas, rígidas e resistentes de material denso, chamadas de faces (skins) separadas por uma camada interna, espessa, pouco rígida e baixa densidade, chamada de núcleo (core).

A função das faces é de suportar as tensões normais de tração, compressão ou cisalhamento coplanar, associadas à flexão da placa. O núcleo, por sua vez, tem, como principal função, manter o afastamento entre as faces e, desta forma, prover alto momento de inércia à placa. Deve, também, **possuir rigidez de cisalhamento ao longo dos planos que são perpendiculares às faces** para garantir que o conjunto funcione de forma monolítica. Assim, sabendo-se que as tensões normais na região central de uma placa flexionada são reduzidas, o núcleo pode ser constituído por materiais de baixa densidade, ou seja, leves o suficiente para compor placas de alta relação resistência/peso.

BRANCO [8] afirma que espumas de menor densidade e, por efeito, mais flexíveis, garantem melhor adesão às placas aumentando a tensão crítica de delaminação placa-espuma-placa. Em contrapartida, concede elasticidade maior ao painel, ocasionando maiores deformações e, por consequência, diminuindo seu limite de utilização (ELS).

No mesmo estudo, BRANCO [8] sugere que as propriedades mecânicas dos painéis sandwich são sensíveis ao tipo (densidade) da espuma polimérica utilizada. No entanto, não cita o quantum desta influência.

Os painéis estudados são constituídos por lâminas compostas em polímero epóxi com carga mineral de alumina e reforço com fibras de vidro (GFRP), tendo como material de núcleo,

espumas rígidas de poliisocianurato (PIR) com densidade variável dentro do intervalo constante da Tabela 2.2.

O estudo numérico foi desenvolvido através de modelos de elementos finitos tridimensionais dos painéis sandwich, com a simulação de:

- (i) estudo de flexão estático em painéis.

## 2. Caracterização Dos Materiais

Foram utilizados, para as lâminas GFRP, os dados mecânicos obtidos em ensaios realizados no Centro de Tecnologia da *OWENS CORNING FIBERGLAS A.S. LTDA.* [1], sediada em Rio Claro/SP e, para as espumas, dados obtidos em catálogo de fabricantes.

### 2.1 Lâminas GFRP

Relativamente às lâminas, são compostas por reforços em fibra de vidro **LT0350/S150/07C01**, da *OWENS CORNING FIBERGLAS A.S. LTDA.* [1] e resina termofixa epóxi com carga mineral de alumina.

Os ensaios de tração e flexão foram feitos na máquina *Emic DL2000* seguindo as normas ISO 527-5 e ASTM D 790, respectivamente.

O ensaio de compressão foi realizado pela empresa *AEPI do Brasil* [2] e executados na Máquina Universal de Ensaio de Tração e Compressão (*PANTEC, Versat 10000*), conforme a norma ASTM-D695.

DESIGNAÇÃO	DENSIDADE	TENSÃO DE RUPTURA			MÓDULOS ELÁSTICOS		
		COMPRESSÃO	TRAÇÃO	CORTANTE	COMPRESSÃO	TRAÇÃO	CORTANTE
	$\gamma$ kg/m <sup>3</sup>	-S <sub>1</sub>	+S <sub>1</sub>	S <sub>12</sub>	E <sub>p</sub>	E <sub>t</sub>	E <sub>c</sub>
LAM_065_ F4065_R-A5935	1940,00	250,00	420,00	55,00	13000,00	19870,00	7469,90

Tabela 2.1 – Limites de Resistência da Lâmina <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Para este estudo, o material “Lâmina” é considerado isotrópico.

### 2.2 Espumas PIR

As espumas utilizadas neste estudo foram obtidas através dos catálogos disponibilizados pela empresa *ELLIOT COMPANY* [3] e exemplificam de forma satisfatória as diferentes densidades e características mecânicas das espumas definidas para comporem o núcleo dos painéis em estudo.

As espumas escolhidas são do tipo rígido, formuladas em sistemas constituídos de dois componentes; um dos componentes é o isocianato (normalmente MDI polimérico), o outro é constituído de um ou mais polióis e demais aditivos. Os polieterpolisiloxanos são os surfactantes mais usados em espumas rígidas, promovendo a formação de uma estrutura de células fechadas, uniformes e sem vazios.

DESIGNAÇÃO	DENSIDA DE	TENSÃO DE RUPTURA			MÓDULOS ELÁSTICOS		
		COMPRESSÃO	TRAÇÃO	CORTANTE	COMPRESSÃO	TRAÇÃO	CORTANTE
	$\gamma$ kg/m <sup>3</sup>	-S <sub>1</sub>	+S <sub>1</sub>	S <sub>12</sub>	E <sub>1,c</sub>	E <sub>1,t</sub>	E <sub>12</sub>
		N/mm <sup>2</sup>			N/mm <sup>2</sup>		
ELFOAM P200X	32,00	0,186	0,351	0,151	4,823	9,611	1,461
ELFOAM P300	48,00	0,448	0,413	0,241	9,646	11,789	3,100
ELFOAM P400	64,00	0,620	0,551	0,379	15,502	18,603	5,856
ELFOAM P600	96,00	0,978	0,930	0,585	32,865	27,146	7,234

Tabela 2.2 – Limite de Resistência das Espumas <sup>(2)</sup>

<sup>(2)</sup> Para este estudo, o material “Espuma” é considerado isotrópico.

A figura 2.1 mostra a tendência da variação da resistência ao esforço cortante da espuma com a variação de sua densidade; a figura 2.2 mostra a tendência da variação do módulo de elasticidade longitudinal da espuma com a variação de sua densidade.

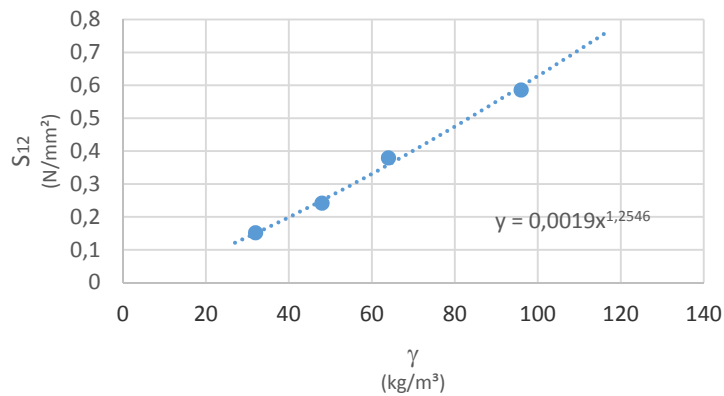


Figura 2.1 – Tendência de Variação do Limite de Resistência ao Corte x Densidade da Espuma (N/mm<sup>2</sup> x kg/m<sup>3</sup>)

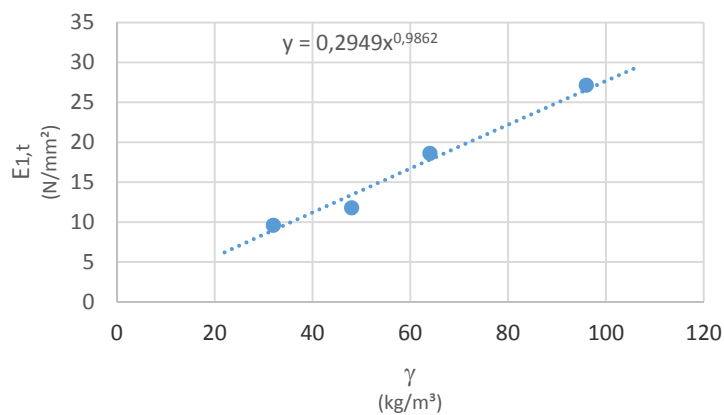


Figura 2.2 – Tendência de Variação do Módulo Elástico Longitudinal x Densidade da Espuma (N/mm<sup>2</sup> x kg/m<sup>3</sup>)

## 2.3 Pannel *Sandwich* – Valores Globais De Falha

### 2.3.1 Deflexões Totais

Segundo MENDONÇA [7], de maneira geral, o dimensionamento de estruturas *sandwich* é condicionado por sua deflexão, sendo recomendado limitar tais deflexões ao valor (1) para a maioria das situações de projeto.

$$\Delta\delta \leq L/300 \quad (1)$$

Desta forma, o limite imposto para a placa é (2):

$$\Delta\delta \leq 2400/300 = 8\text{mm} \quad (2)$$

Para a determinação do módulo da carga a ser aplicada para o ensaio detalhado em 3.2, analisamos as deflexões do pannel de menor rigidez (núcleo ELFOAM P200X) para incrementos de carga em módulo de 0,5kN até o limite estabelecido em (2).

DESIGNAÇÃO	DENSIDADE	FORÇA TOTAL	DEFLEXÃO
	$\gamma$	F	$\Delta\delta$
	kg/m <sup>3</sup>	kN	mm
ELFOAM P200X	32,00	0,50	1,60
		1,00	3,30
		1,50	4,90
		2,00	6,50
		2,50	8,10
		3,00	9,80

Tabela 2.3 – Carga Total para o limite L/300 para o pannel de menor rigidez

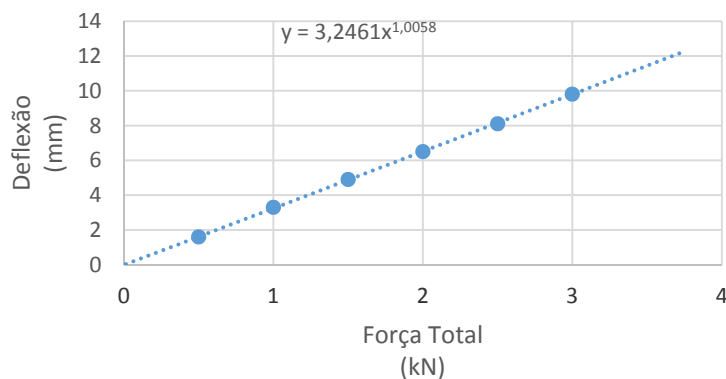


Figura 2.3.1 – Tendência de Variação da Deflexão x Força Total Aplicada (mm x kN)

Assim, para o ensaio de flexão, definiu-se a força total aplicada (3).

$$F_t = 0,3103 * 8^{0,994} = 2,45\text{kN} \quad (3)$$

### 2.3.2 Tensões Críticas – Critérios De Falha

As **tensões críticas de falha** foram estimadas numericamente através da Teoria Clássica da Mecânica e, então, comparadas às **tensões atuantes** nas superfícies e no núcleo.

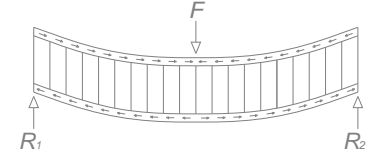
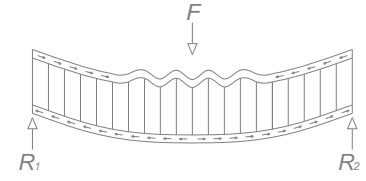
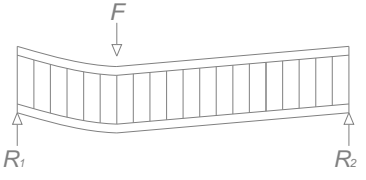
Tipo Da Falha	Representação	Referência
Escoamento Ou Ruptura Das Faces		Tabela 2.1
Flambagem Local Das Faces ( <i>Wrinkling</i> )		ELFOAM P200X $\sigma_{cr} = 42,474 \text{ MPa}^{(3)}$
		ELFOAM P300 $\sigma_{cr} = 58,424 \text{ MPa}^{(3)}$
		ELFOAM P400 $\sigma_{cr} = 84,083 \text{ MPa}^{(3)}$
		ELFOAM P600 $\sigma_{cr} = 102,331 \text{ MPa}^{(3)}$
Cisalhamento Do Núcleo		Tabela 2.2

Tabela 2.4 – Flexão - Critérios de Falha

<sup>(3)</sup> Tensão Crítica de Instabilidade da Lâmina, segundo DAVIES [9].

## 3. Simulação Numérica

### 3.1 Descrição Do Modelo Adotado

Os modelos estudados foram reproduzidos em ambiente virtual seguindo as recomendações normativas *ASTM* [4]. Para esta simulação, foi utilizada a ferramenta de cálculo por elementos finitos **RFEM 5**, da *Dlubal Software GmbH*.

Foram executados quatro ensaios de flexão para as quatro variações de densidade de espuma relacionadas na Tabela 2.2.

A constituição do pannel *sandwich* é demonstrada na Fig. 3.1.1.

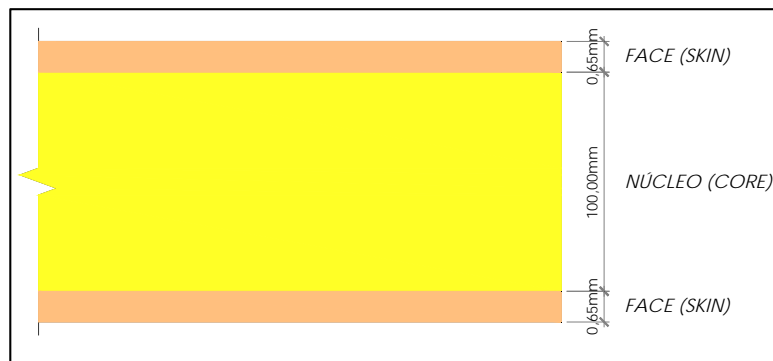


Figura 3.1.1 – Constituição do Pannel *Sandwich*

### 3.2 Simulação de Ensaio de Flexão

Para os ensaios de flexão, foi adotado o modelo proposto pela *ASTM C 393-00* [5], à 4 (quatro) pontos; os painéis são 1000mm x 2600mm x 101.3mm (L x C x H) – Figura 3.1.2.

A carga total foi dividida em duas parcelas iguais de 5kN cada, sendo distribuída linearmente sobre duas linhas equidistantes em 430mm do centro geométrico da placa; valor lançado do carregamento total conforme (3). (Figura 3.1.2).

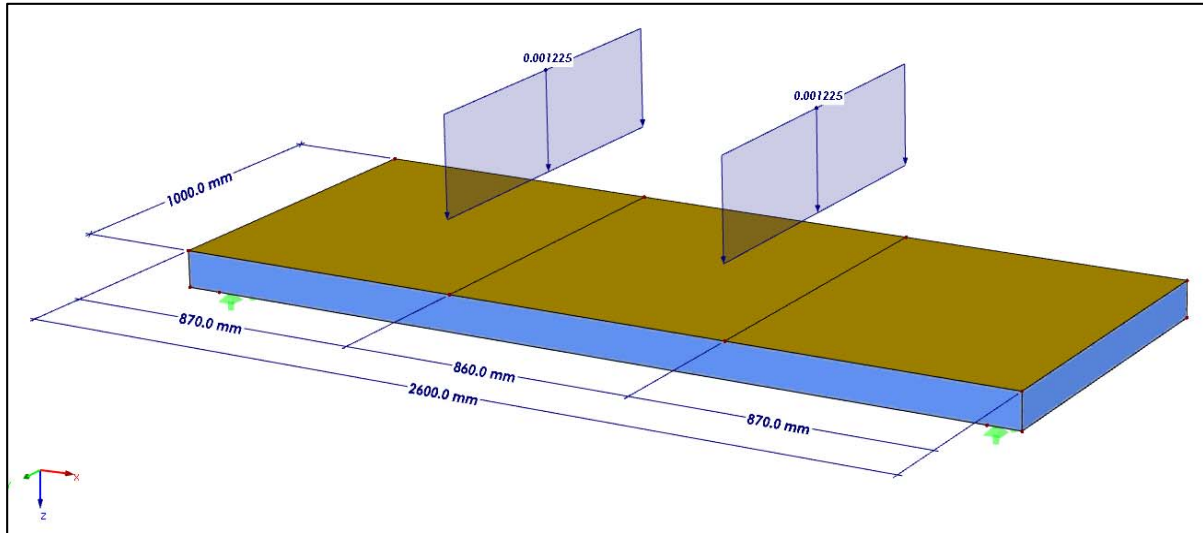


Figura 3.1.2 – Modelo Experimental Adotado

## 4. Resultados e Discussão

A rigidez do núcleo tem influência da rigidez flexural do pannel mas sua principal contribuição para a estrutura *sandwich* é quanto à elevação do momento de inércia do pannel e absorver as tensões cisalhantes ao longo de sua espessura.

### 4.1 Resultados

As figuras 4.1.a à 4.1.d apresentam as deformadas globais da estrutura para cada valor de densidade da espuma do pannel.

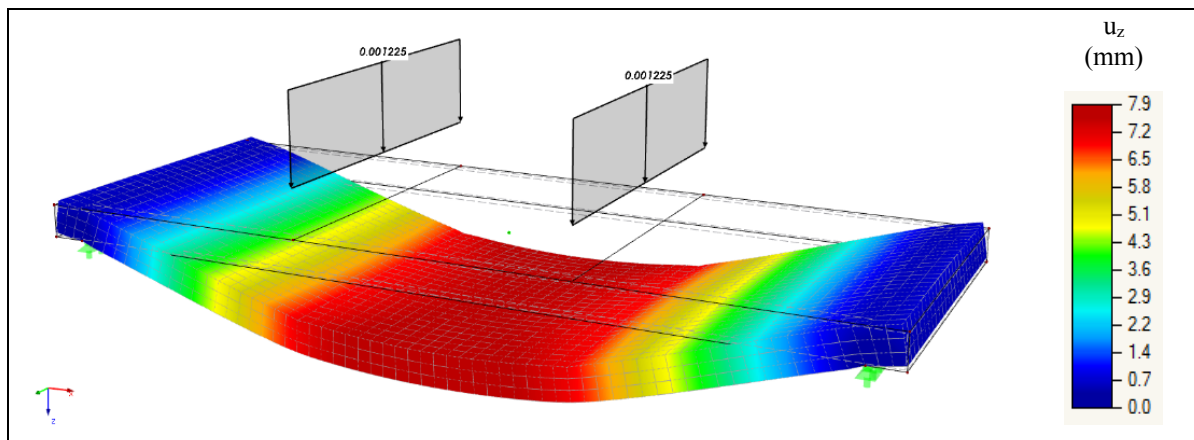


Figura 4.1.a – Deformada do Modelo - ELFOAM P200X

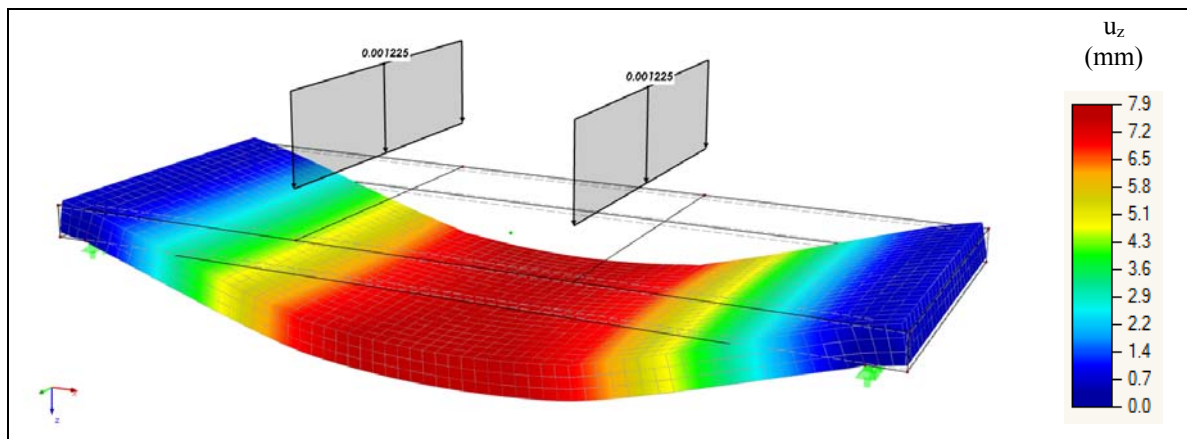


Figura 4.1.b – Deformada do Modelo - ELFOAM P300

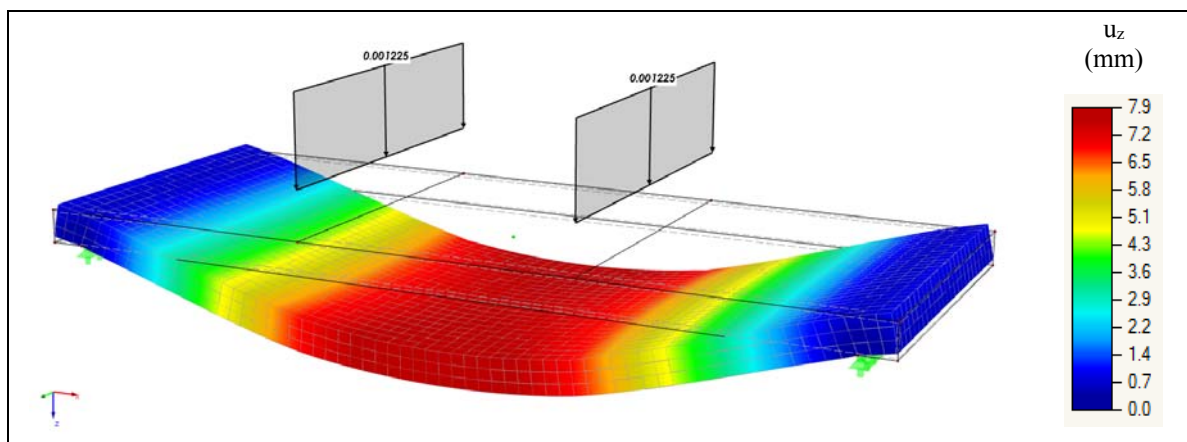


Figura 4.1.c – Deformada do Modelo - ELFOAM P400

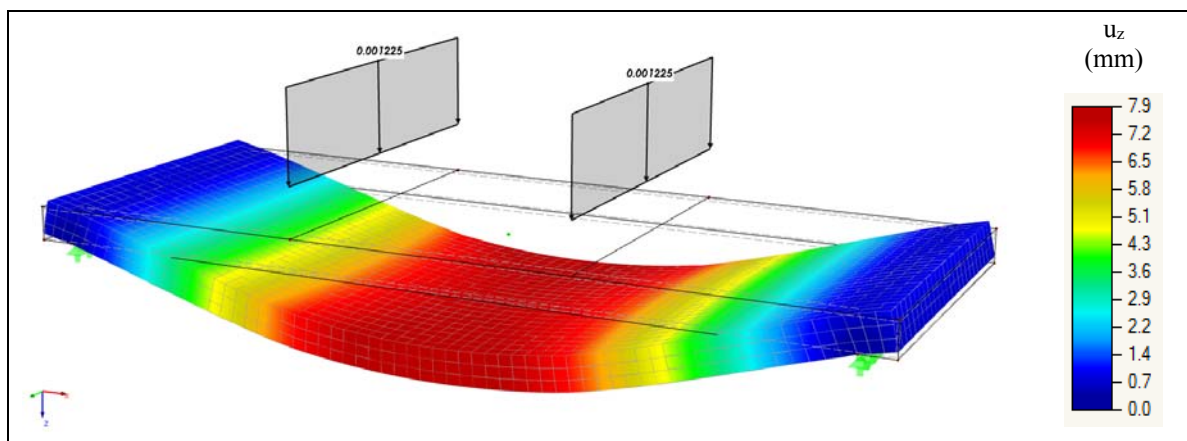


Fig. 4.1.d – Deformada do Modelo - ELFOAM P600

As Figuras 4.2 apresentam a tendência de variação das deformações em função da variação de densidade do material do núcleo.

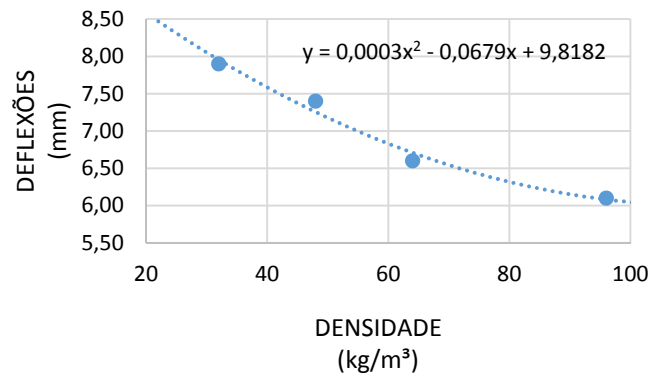


Figura 4.2.a – Curva Deflexão x Densidade da Espuma (mm x kg/m³)

	$\Delta\gamma$		$\Delta U_z$	
	kg/m³	%	mm	%
MÉDIA	21,33	30,56%	0,60	8,24%
DESVIO	9,24	4,81%	0,17	2,31%

Figura 4.2.b – Avaliação Numérica da Curva Deflexão x Densidade da Espuma

Na curva Deflexão x Densidade (figura 4.2.a), podemos observar o regime que relaciona o acréscimo da densidade da espuma com o decréscimo da deflexão no pannel. Enquanto o acréscimo da densidade é, em média, de 21,33 kg/m³ (variação de 30,56%), o decréscimo nos valores de deflexão não ultrapassa, em sua média, 0,60mm (variação de 8,24%).

As figuras 4.3.a à 4.3.d apresentam as tensões normais na direção “x” à seção da lâmina superior ( $\sigma_{s,x}$ ).

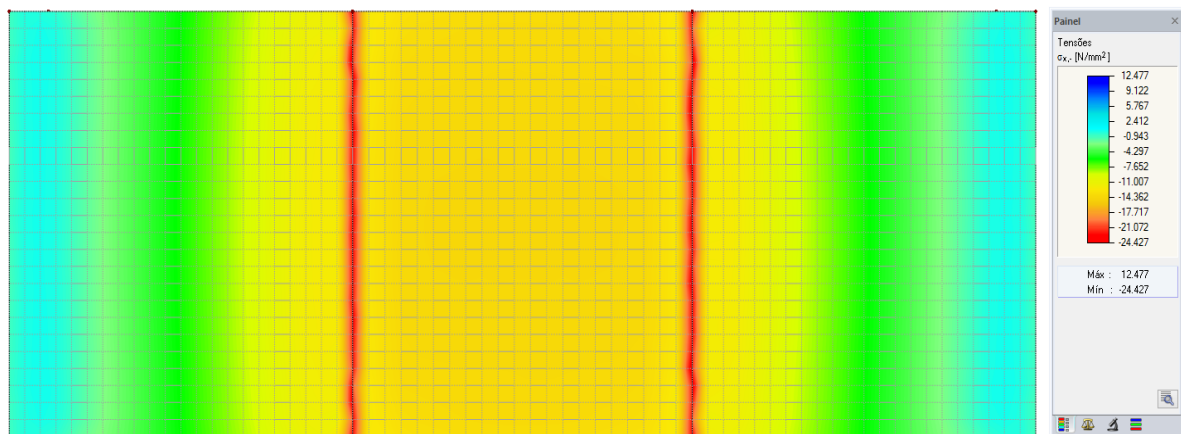


Figura 4.3.a – Tensões Normais na Face Superior - ELFOAM P200X (N/mm²)



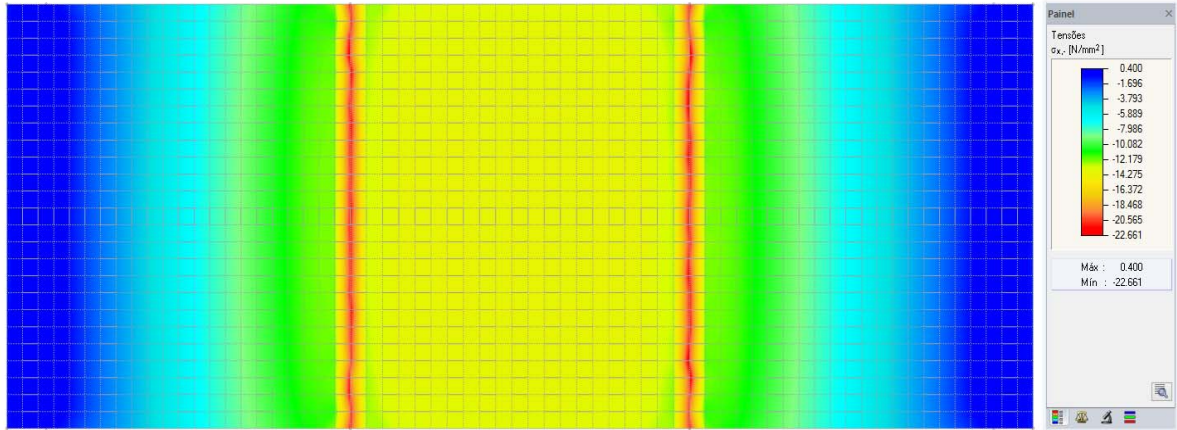


Figura 4.3.b – Tensões Normais na Face Superior - ELFOAM P300 (N/mm<sup>2</sup>)

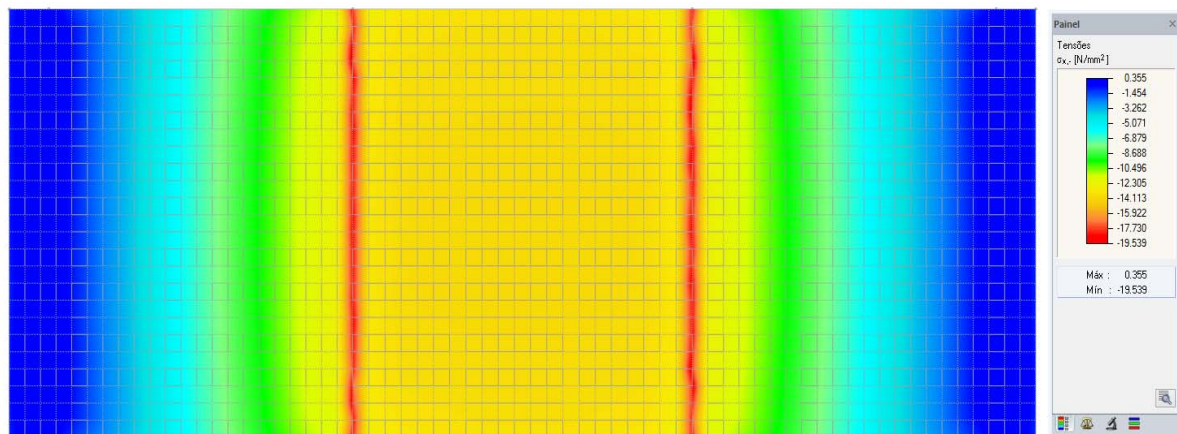


Figura 4.3.c – Tensões Normais na Face Superior - ELFOAM P400 (N/mm<sup>2</sup>)

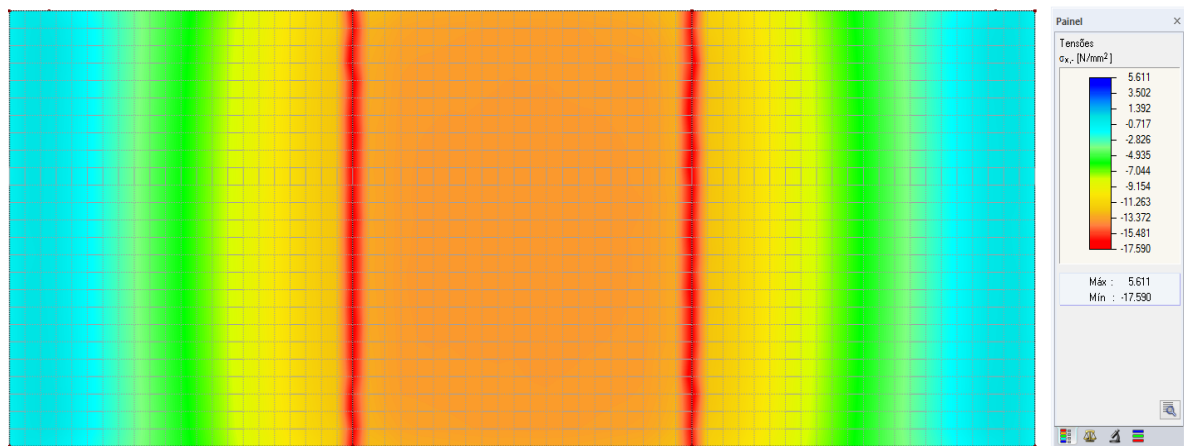


Figura 4.3.d – Tensões Normais na Face Superior - ELFOAM P600 (N/mm<sup>2</sup>)

As figuras 4.4.a e 4.4.b apresentam a tendência de variação das tensões na superfície da lâmina superior em função da variação de densidade do material do núcleo.

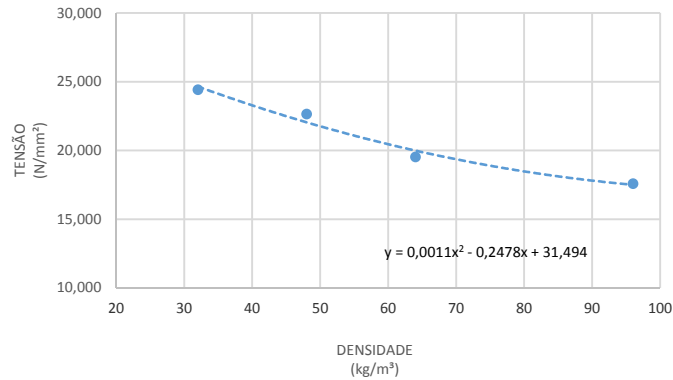


Fig. 4.4.a – Curva Tensão Normal x Densidade da Espuma (N/mm<sup>2</sup> x kg/m<sup>3</sup>)

	$\Delta\gamma$		$\Delta\sigma_x$	
	kg/m <sup>3</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%
MÉDIA	21,33	30,56%	2,28	10,33%
DESvio	9,24	4,81%	0,74	3,29%

Figura 4.4.b – Avaliação Numérica da Curva Tensão Normal x Densidade da Espuma

Na curva Tensão x Densidade (figura 4.4.a), podemos observar o regime que relaciona o acréscimo da densidade da espuma com o decréscimo da tensão na face externa da lâmina superior do pannel.

Da mesma forma que as deflexões, enquanto o acréscimo da densidade é, em média, de 21,33 kg/m<sup>3</sup> (variação de 30,56%), o decréscimo nos valores das tensões não ultrapassa, em sua média, 2,28 N/mm<sup>2</sup> (variação de 10,33%). Relevante notar que as maiores tensões são oriundas do contato entre a superfície e a barra fictícia de aplicação do carregamento.

As figuras 4.5.a à 4.5.d apresentam as tensões normais na direção “x” à seção da lâmina inferior ( $\sigma_{i,x}$ ).

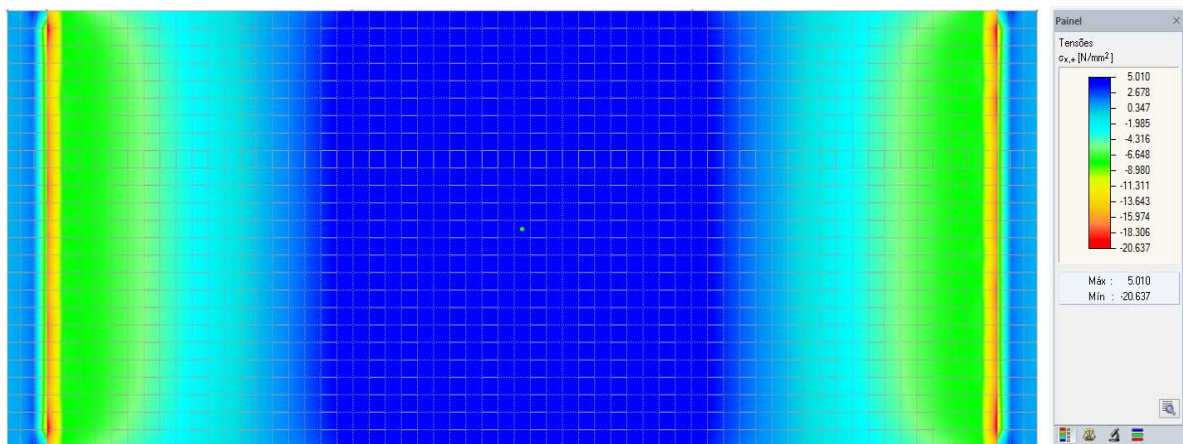


Figura 4.5.a – Tensões Normais na Face Inferior - ELFOAM P200X (N/mm<sup>2</sup>)



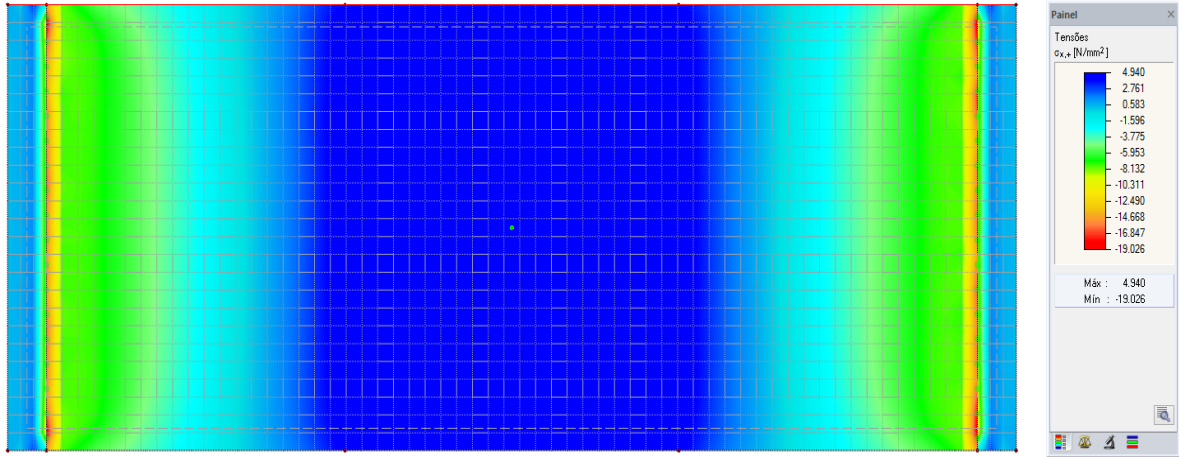


Figura 4.5.b – Tensões Normais na Face Inferior - ELFOAM P300 (N/mm<sup>2</sup>)

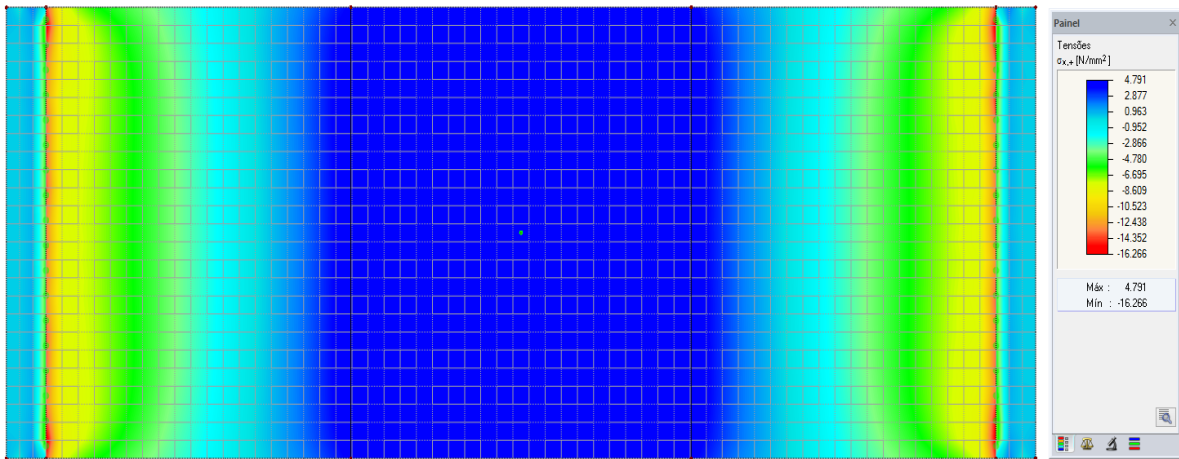


Figura 4.5.c – Tensões Normais na Face Inferior - ELFOAM P400 (N/mm<sup>2</sup>)

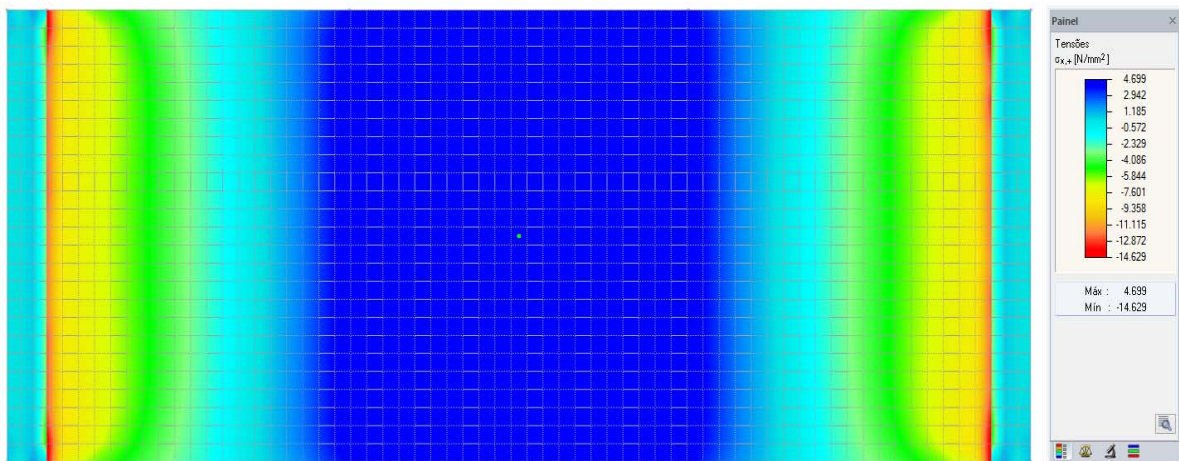


Figura 4.5.c – Tensões Normais na Face Inferior - ELFOAM P600 (N/mm<sup>2</sup>)

As figuras 4.6.a e 4.6.b apresentam a tendência de variação das tensões na superfície da lâmina inferior em função da variação de densidade do material do núcleo.

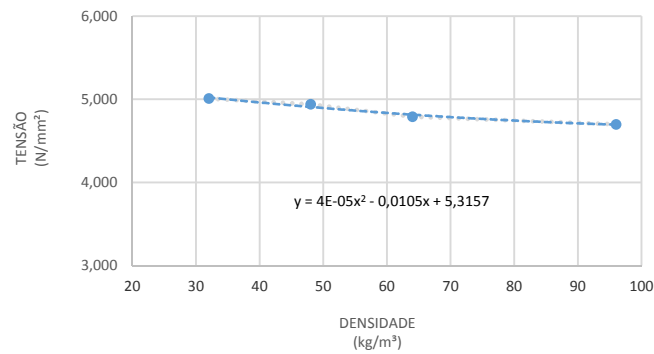


Figura 4.6.a – Curva Tensão Normal x Densidade da Espuma (N/mm<sup>2</sup> x kg/m<sup>3</sup>)

	$\Delta\gamma$		$\Delta\sigma^x$	
	kg/m <sup>3</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%
MÉDIA	21,33	30,56%	0,10	2,11%
DESVIO	9,24	4,81%	0,04	0,83%

Figura 4.4.b – Avaliação Numérica da Curva Tensão Normal x Densidade da Espuma

Na curva Tensão x Densidade (figura 4.6.a), podemos observar o regime que relaciona o acréscimo da densidade da espuma com o decréscimo da tensão na face externa da lâmina inferior do pannel.

O acréscimo da densidade é, em média, de 21,33 kg/m<sup>3</sup> (variação de 30,56%), enquanto o decréscimo nos valores das tensões não ultrapassa, em sua média, 0,10 N/mm<sup>2</sup> (variação de 2,11%).

Importante verificar, através das isobandas, a presença de tensões de compressão oriundas do contato entre a superfície do laminado e a barra fictícia dos apoios (áreas em **vermelho**).

As figuras 4.7.a à 4.7.d apresentam as tensões cortantes ao longo da espessura do núcleo ( $\tau_{x,y}$ ).

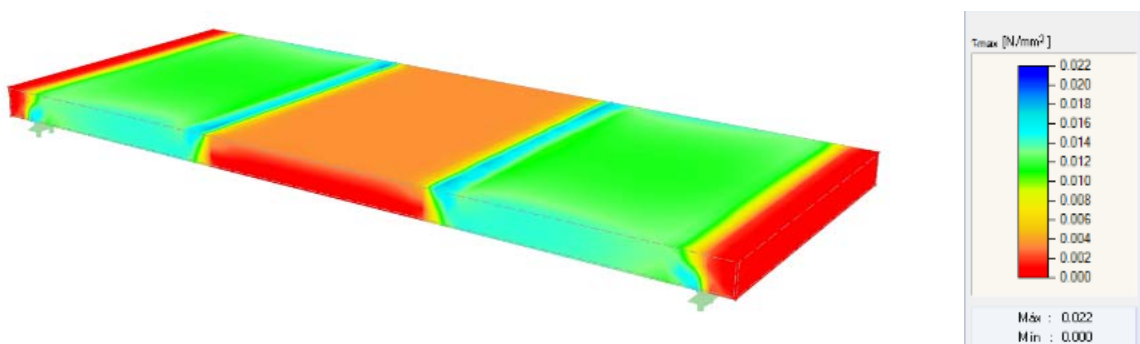


Figura 4.7.a – Tensões de Cisalhamento - ELFOAM P200X (N/mm<sup>2</sup>)

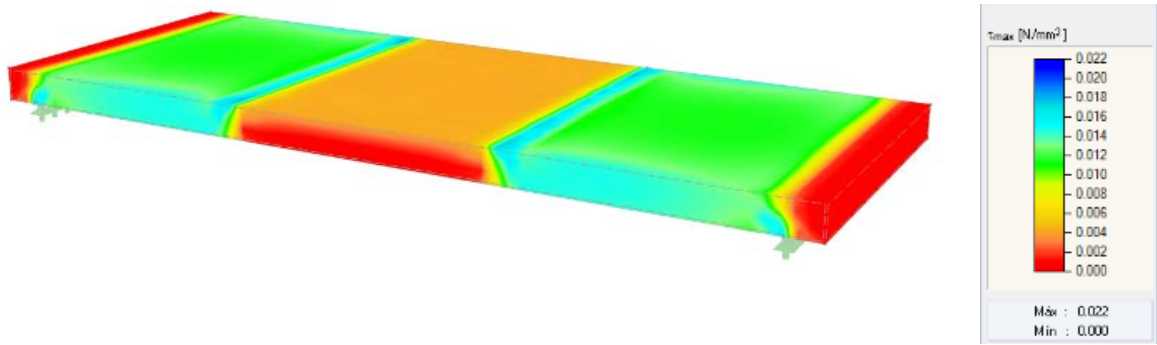


Figura 4.7.b – Tensões de Cisalhamento - ELFOAM P300 (N/mm<sup>2</sup>)

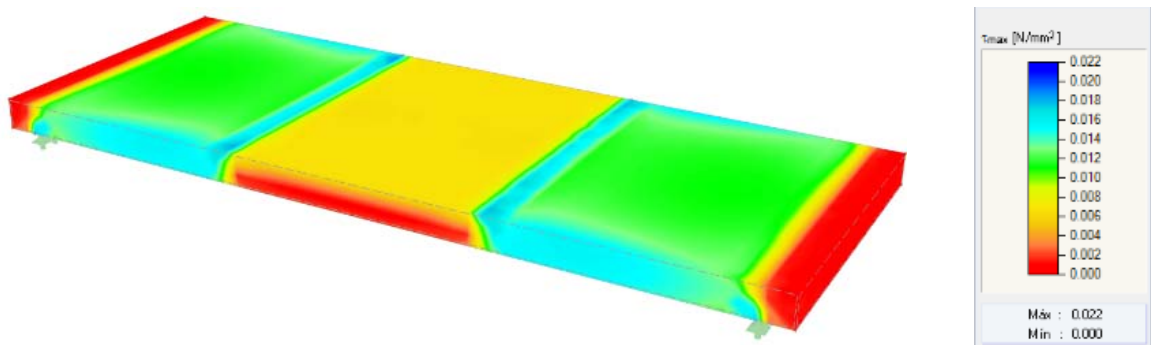


Figura 4.7.c – Tensões de Cisalhamento - ELFOAM P400 (N/mm<sup>2</sup>)

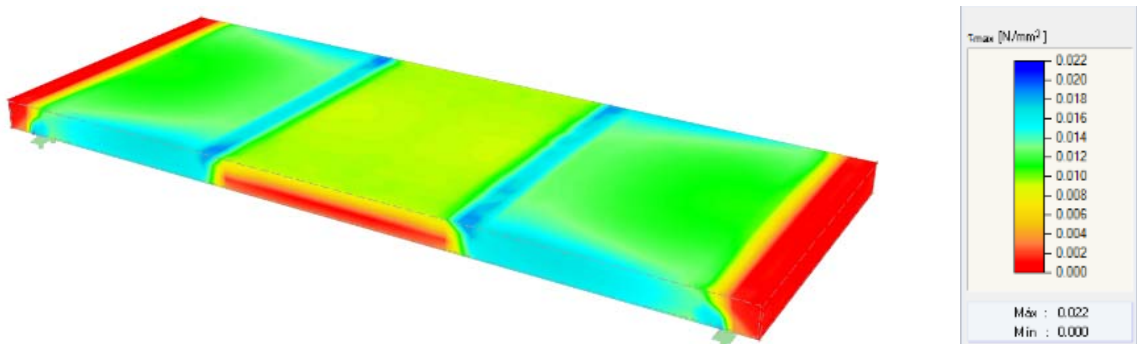


Figura 4.7.d – Tensões de Cisalhamento - ELFOAM P600 (N/mm<sup>2</sup>)

Como é possível avaliar através das isobandas nas figuras 4.7.a a 4.7.d, as tensões de cisalhamento possuem reduzida magnitude, o que confirma a teoria clássica das estruturas *sandwich*.

De fato, pode-se notar que a variação das tensões cortantes ao longo da espessura da espuma é sutil, sugerindo que a densidade do material do núcleo, para o caso de placas, influi modestamente na distribuição dos esforços.

#### 4.2 Verificação Quanto À Falha

A Tabela 4.2 traz a comparação entre os valores limites e os valores estimados tensões à que estão submetidos os painéis. As deflexões não foram levadas à comparação já que a carga aplicada foi definida à partir do valor da deflexão limite ( $\Delta\delta \leq L/300$ ).



## Referências

- [1] [www.owenscorning.com.br/pt-br/home](http://www.owenscorning.com.br/pt-br/home)
- [2] [www.aepi.com.br/](http://www.aepi.com.br/)
- [3] [www.elliottfoam.com](http://www.elliottfoam.com)
- [4] *American Society for Testing and Material – ASTM*
- [5] *Standart Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. ASTM Standart C 393-00.*
- [6] *Standart Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions. ASTM Standart C 364-99.*
- [7] MENDONÇA, P. T. R. *Materiais compostos & Estruturas-sanduiche: projeto e análise.* Barueri-SP: Manole, 2005.
- [8] BRANCO, C.M. *Influência da Densidade da Espuma de Poliuretano no Comportamento Mecânico de Painéis Sandwich de Compósito.* Lisboa. Portugal: IST, 1995.
- [9] DAVIES, J.M., *Lightweight sandwich construction*, Osney Mead, Osxford OX2 0EL: Blackwell Science Lta, 2001.