

CÁLCULO ESTRUTURAL

CRITÉRIOS PARA CÁLCULO

Quando em uso, as estruturas são submetidas a carregamentos que geram tensões de tração, flexão, cisalhamento, e compressão. Sempre que as estruturas forem dimensionadas para resistir esses esforços, dizemos que o dimensionamento é feito por critério de resistência.

Além de resistir aos esforços mencionados, as estruturas devem também apresentar deformação máxima dentro de limites aceitáveis, além de estabilidade quando submetidas a compressão. Tanto a deformação máxima como a instabilidade das estruturas pode ocorrer em níveis de tensão muito inferiores à resistência do material. Este fato é particularmente dramático no caso de materiais de baixo módulo de elasticidade, como o "Fiberglass".

O dimensionamento estrutural é feito comparando a tensão atuante com a resistência do laminado, mantendo as deformações máximas dentro de limites admissíveis. A estabilidade elástica da estrutura é conferida a seguir, após o dimensionamento para resistência.

São três, portanto, os critérios para dimensionamento estrutural de laminados:

. RESISTÊNCIA

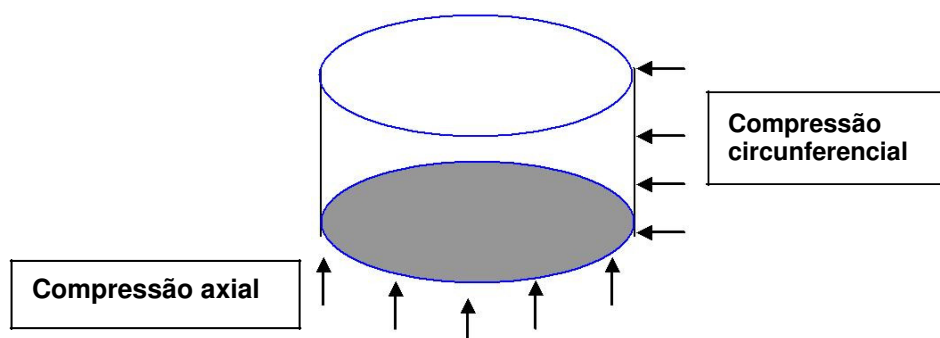
Leva em consideração a resistência do laminado às tensões de tração, flexão, compressão e cisalhamento.

. DEFORMAÇÃO

Leva em consideração a rigidez da estrutura. Com veremos adiante, este é o caso crítico para dimensionamento de estruturas de baixo módulo, como os plásticos reforçados com fibras de vidro.

. ESTABILIDADE

Deve ser conferida sempre que a estrutura for submetida a esforços de compressão. Depende do módulo de elasticidade do laminado e da geometria da peça.



MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Existem 3 métodos para dimensionamento estrutural de laminados:

. MÉTODO EMPÍRICO

Por este método, a espessura inicial é arbitrada com base na experiência e sentimento do projetista. A otimização da espessura é feita “a posteriori”, colocando a estrutura em uso. Esse método é, sem qualquer sombra de dúvida, o mais usado para dimensionamento estrutural de laminados construídos com poliéster reforçado com fibras de vidro.

O método consiste aproximadamente no seguinte:

- Arbitrar espessura de 3,0 mm.

- Projetar a peça com superfícies curvas, evitando tanto quanto possível as superfícies planas e flexíveis. As superfícies curvas, além de esteticamente atraentes, conferem rigidez à estrutura. O projetista experiente sabe que, do ponto de vista estrutural, é a falta de rigidez (e não de resistência) o grande desafio estrutural imposto pelo Fiberglass. Muitas vezes o projetista prevê também a laminação de nervuras para enrijecer superfícies extensas e com grandes raios de curvatura. A posição das nervuras, bem como sua geometria, são estabelecidas por critérios estéticos e facilidade de laminação.

- A estrutura é colocada em uso e otimizada. Em geral, a otimização é feita pela inclusão de uma ou outra nervura adicional, aumento de nervuras existentes e ajuste de curvaturas.

- A espessura arbitrada no início (3,0 mm) raramente é modificada. Trata-se de uma espessura “mágica” para laminados corriqueiros, como domos de cobertura, pára-lamas de automóveis, painéis diversos e muitos outros. Reforços localizados podem ser incluídos no laminado quando necessário. A espessura pode ser aumentada em locais de maior solicitação, conforme ditado pelo desempenho da estrutura em uso.

Nota: Existem algumas exceções célebres à regra dos 2,5 – 3,0 mm. Telhas onduladas, por exemplo, tem espessuras entre 0,8 e 1,5 mm. Tanques e tubos para trabalhar em ambientes agressivos devem ter espessura mínima 4,5 mm.

Estruturas submetidas a solicitações de maior magnitude, vácuo, ou em contato com ambientes agressivos, devem ser dimensionadas pelo método teórico a ser apresentado em seguida.

. MÉTODO TEÓRICO

Estruturas de geometria simples, submetidas a carregamentos também simples, são calculadas pela teoria da elasticidade, com recurso às mesmas expressões usadas para cálculo estrutural de qualquer outro material. A teoria da elasticidade permite ao calculista conhecer as várias tensões de tração, flexão, etc., bem como deformações e momentos fletores atuantes na estrutura.

As tensões admissíveis, ou tensões de trabalho, dependem da natureza do carregamento e do ambiente em que a estrutura trabalha. As tensões admissíveis são obtidas pela aplicação de coeficientes de segurança às tensões de ruptura do material. No caso específico do Fiberglass, também temos que levar em consideração a natureza do ambiente em contato com a estrutura.

Para aplicações estruturais em ambientes não agressivos e à temperatura ambiente, são recomendados os seguintes coeficientes de segurança para Fiberglass:

- Solicitações estáticas de curta duração2
- Solicitações estáticas de longa duração4
- Solicitações cíclicas5

Aplicações estruturais em contato com ambientes agressivos seguem recomendações bem diferentes no que diz respeito aos coeficientes de segurança. Para começar, o próprio conceito de coeficiente de segurança é questionado, sendo as estruturas dimensionadas para alongamentos máximos admissíveis. Estes alongamentos máximos admissíveis dependem dos materiais usados e seqüência de laminação, bem como da natureza do ambiente agressivo. A ASTM, de maneira conservadora, estabelece um alongamento máximo admissível de 0,1% (0,001) para estruturas de Fiberglass em contato com ambientes agressivos.

As expressões matemáticas usadas para cálculo são encontradas em vários livros especializados. Tais expressões levam em consideração as condições de apoio (contorno), o carregamento e a geometria da estrutura. Algumas expressões são extremamente complexas.

O que segue é uma pequena amostra das expressões teóricas aplicáveis a placas isotrópicas, submetidas a carregamento lateral uniforme. A deformação lateral máxima não deve exceder a espessura das placas, caso contrário as expressões deixam de ser aplicáveis.

As expressões gerais para cálculo de flecha máxima e momento fletor máximo em placas planas submetidas a carregamento lateral uniforme são:

$$y = K_1 \frac{qa^4}{E't^3}$$

$$y < t$$

$$M = K_2 q a^2$$

Onde: y = flecha máxima admissível

K_1 e K_2

= coeficientes dependentes da geometria da placa, tipo de apoio e tipo de carregamento

q = carga lateral uniforme

a = uma dimensão da placa (raio, largura, etc.)

E' = módulo de flexão

M = momento fletor máximo

A máxima tensão de flexão admissível no laminado é:

Onde:

$$\sigma' = \frac{6M}{t^2 \cdot (cs)}$$

σ' = resistência á flexão

c

s = coeficiente de segurança

A espessura da parede é dada por:

$$t = \frac{K_1 q a^4}{E' y}^{1/2}$$

$$y < t$$

$$t = \frac{(6)(K_2)(q)(a^2)(cs)^{1/2}}{\sigma'}$$

...respectivamente pelos critérios de rigidez (deformação) e resistência.

O problema fica resolvido conhecidos os coeficientes K_1 e K_2 em caso particular. Vejamos alguns exemplos simples:

- Placa circular de raio "a" submetida a carregamento lateral uniforme:

se a placa for engastada

$$K_1 = \frac{3}{16}$$

$$K_2 = \frac{1}{8}$$

se simplesmente apoiada

$$K_1 = \frac{15}{16}$$

$$K_2 = \frac{1,5}{8}$$

- Placa retangular de comprimento “b” e largura “a”, submetida a carregamento lateral uniforme:

Neste caso os coeficientes K_1 e K_2 podem ser encontrados na tabela seguinte, para placas engastadas ou simplesmente apoiadas.

(Tabela 1)

b/a	ENGASTADA		APOIADA	
	K_1	K_2^*	K_1	K_2^{**}
1,0	0,015	0,0513	0,049	0,0479
1,1	0,018	0,0581	0,058	0,0554
1,2	0,021	0,0639	0,068	0,0627
1,3	0,023	0,0687	0,077	0,0694
1,4	0,025	0,0726	0,085	0,0755
1,5	0,026	0,0757	0,093	0,0812
1,6	0,028	0,0780	0,100	0,0862
1,7	0,029	0,0799	0,106	0,0908
1,8	0,029	0,0812	0,112	0,0948
1,9	0,030	0,0822	0,117	0,0985
2,0	0,030	0,0829	0,122	0,1017
∞	0,030	0,0833	0,156	0,1250

K_1 e K_2 para placas retangulares, carregamento uniforme

(*) = Momento fletor máximo no engaste – (**) = Momento fletor máx. no centro

As expressões para cálculo estrutural de outras geometrias (placas elípticas, triangulares, etc.), carregamentos (cargas concentradas, hidrostáticas) e condições de apoio (combinação de bordas em balanço, engastadas e apoiadas) podem ser encontradas na literatura especializada. O livro “Formulas for Stress and Strain” de Roark Young, é particularmente útil para cálculo estrutural.

As expressões teóricas aqui apresentadas são aplicáveis apenas a placas planas, submetidas a carregamento lateral uniforme.

Vejamos agora o método comparativo.

. MÉTODO COMPARATIVO

Este método pode ser aplicado para dimensionar uma estrutura qualquer quando é sabido que outra estrutura similar tem desempenho satisfatório. As condições para aplicação do método comparativo são:

- As estruturas devem ser geometricamente semelhantes;
- Os carregamentos também devem ser semelhantes;
- As duas estruturas devem ser apoiadas da mesma maneira;
- As estruturas devem trabalhar em ambientes idênticos.

Satisfeitas as condições acima, a conversão é levada a efeito de maneira extremamente simples, através dos "coeficientes de espessura".

No caso específico de estruturas com a mesma geometria, submetidas a carregamentos idênticos, conhecidos os módulos e resistência de cada material, é possível a construção de uma tabela de "coeficientes de espessura" para obtenção da espessura da estrutura A, conhecida a da estrutura B.

Os coeficientes de espessura dependem do que se deseja da estrutura A em relação à estrutura B. Assim sendo, se for desejado que as duas estruturas tenha a mesma resistência à flexão, deve ser usado o coeficiente de flexão. Para mesma rigidez deve ser usado o coeficiente de rigidez e assim sucessivamente.

	% Vidro	Coeficiente de Tração	Coeficiente de Flexão	Coeficiente de Rigidez
Fiberglass	30%	1,0	1,0	1,0
Alumínio	--	1,6	0,8	2,2
Aço	--	2,5	1,0	3,3

A tabela de coeficiente de espessura é aplicável apenas a peças de mesma geometria, apoiadas de maneira idêntica e pressupõe os mesmos coeficientes de segurança para aço, alumínio e fiberglass, o que nem sempre é verdadeiro. A observação da tabela nos diz que os laminados de fiberglass com 30% de fibras de vidro picadas precisam ter espessuras aproximadamente:

- 2,5 vezes a espessura do aço para a mesma resistência à tração
- Espessura igual da do aço para a mesma resistência à flexão
- 3,3 vezes a espessura do aço para mesma deformação lateral (flecha)

Exemplos ilustrativos:

Vamos considerar um exemplo ilustrativo. Suponhamos um domo de cobertura construído em aço, com a espessura de 1,0 mm. É desejado substituir esse domo de aço por outro de fiberglass com a mesma geometria. Vamos supor domo de fiberglass construído com 30% de roving picado e instalado da mesma maneira que o de aço.

A expressão geral para cálculo da espessura da estrutura A, conhecida a espessura da estrutura B é:

$$t_A = t_B \text{ (coeficiente de espessura)}$$

em nosso caso específico, $t_{\text{fiber}} = t_{\text{aço}}$ (coeficiente de espessura)

...para a mesma resistência à tração: $t_{\text{fiber}} = (2,5)(1,0) = 2,5 \text{ mm}$

...para a mesma resistência à flexão: $t_{\text{fiber}} = (1,0)(1,0) = 1,0 \text{ mm}$

...para a mesma rigidez: $t_{\text{fiber}} = (3,3)(1,0) = 3,3 \text{ mm}$

NOTA IMPORTANTE:

Os métodos descritos acima foram obtidos nas décadas de 70 e 80 e seguem as normas até hoje utilizadas para compostos de resinas reforçadas com fibras de vidro na forma de roving picado ou mantas. Outros materiais de reforços foram desenvolvidos até então e somam propriedades importantes na obtenção de laminados com maior resistência, menor densidade, leveza, maior resistência química e térmica, entre outra. Exemplo disto as fibras de carbono e aramida, tecidos especiais de vidro e híbridos, material de núcleo (Coremat p.ex.), véus de poliéster (sintéticos), etc., além de resinas especiais e aditivos modificadores de propriedades.

Convém ao consultor manter-se atualizado a respeito destes materiais bem como novos processos de fabricação de “Compósitos”, como hoje são chamados nossos antigos Plásticos Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV) ou simplesmente “Fiberglass”.

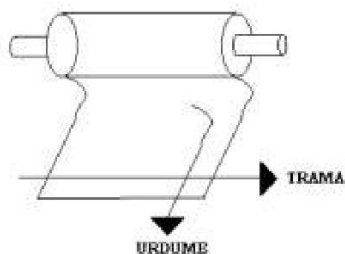
Nota do responsável por esta reprodução

ESTUDO COMPARATIVO DE OUTROS MATERIAIS DE REFORÇO:

TECIDOS PARA REFORÇO

Os tecidos para reforço de materiais plásticos são efetivamente “tecidos” que são fabricados com fios que podem ser de FIBRA DE VIDRO, FIBRA DE CARBONO e FIBRA ARAMIDA (KEVLAR)

Disposição dos fios



2 Fios (Urdume e Trama)

Os fios podem ser torcidos (e retorcidos) ou não, dispostos em forma de Tela, Sarja, Raso Turco, Giro Inglês, etc... → diferentes performances. A superfície pode ser tratada para compatibilidade com resinas fenólicas, poliéster, epóxi, etc...

POR QUE SE USAM OS TECIDOS?

São mais caros, obviamente, que fios e mantas, mas oferecem insubstituíveis propriedades técnicas:

- Controles precisos de espessura, peso e resistência;
- Propriedades isotropas e anisótropas (resistência em determinadas mas várias direções) → podem-se colocar várias camadas → tecidos multiaxiais costurados;
- Economia de resina;
- Baixo peso (envolve todas as estruturas = menor custo);
- Melhora da relação “fibra x resina”;
- O produto é sempre mais leve com superioridade de resistência.

Abaixo alguns valores comparativos de resistência mecânica entre mantas de roving picado e tecidos de fibras de vidro:

Testes comparativo de Resistências de TECIDOS X MANTAS

Reforços utilizados: (todos com 15 camadas)

Manta de fibra de vidro 450 g/m²

Tecido de fibra de vidro bi-direcional TEXIGLASS WR-200 (200g/m²)

Tecido de fibra de vidro bi-direcional TEXIGLASS WR-326 (326g/m²)

Resistência à Tração Kg/cm² x 1.000

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35		
Manta 450 (espessura: 11mm)																																				
Tecido WR-200 (espessura: 3,4mm)																																				
Tecido WR-326 (espessura: 4,2mm)																																				

Resistência ao Impacto Joules/m x 100

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Manta 450 (espessura: 11mm)																											
Tecido WR-200 (espessura: 3,4mm)																											
Tecido WR-326 (espessura: 4,2mm)																											

Resistência à Flexão Kg/cm² x 100

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36	38	40	50	60	70	80	90	
Manta 450 (espessura: 11mm)																										
Tecido WR-200 (espessura: 3,4mm)																										
Tecido WR-326 (espessura: 4,2mm)																										

Módulo de Elasticidade Mpa x 10.000

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Manta 450 (espessura: 11mm)																					
Tecido WR-200 (espessura: 3,4mm)																					
Tecido WR-326 (espessura: 4,2mm)																					

Os resultados aqui apresentados referem-se exclusivamente às amostras ensaiadas e servem apenas para fins ilustrativos, não podendo ser usados para fins técnicos.

Apresentamos abaixo a comparação entre tecidos e mantas baseados nas tabelas obtidas nos testes realizados no **SENAI** (SP).

Reforços comparados: manta 450g e tecido WR-200:

Medição	Manta 450	Tecido WR-200	Conclusão
Preço (R\$/m ²)	3,08	5,43	76,3% mais caro
Peso (g/m ²)	450	200	56% mais leve
Espessura c/ 15 camadas (mm)	11,0	3,4	69% menor
Área Coberta (m ² /Kg)	2,22	5,00	125% maior
Tração-Força Máxima - kgf/cm ²	1.247	2.453	97% maior
Impacto-Izoid A - J/m	403	1.098	172% maior
Flexão-Força Máxima-Kgf/cm ²	1.988	2.821	42% maior

Reforços comparados: manta 450g e tecido WR-326:

Medição	Manta 450	Tecido WR-326	Conclusão
Preço (R\$/m ²)	3,08	5,07	65% mais caro
Peso (g/m ²)	450	326	28% mais leve
Espessura c/ 15 camadas (mm)	11,0	4,2	62% menor
Área Coberta (m ² /Kg)	2,22	3,07	38% maior
Tração-Força Máxima - kgf/cm ²	1.247	3.381	171% maior
Impacto-Izoid A - J/m	403	2.040	406% maior
Flexão-Força Máxima-Kgf/cm ²	1.988	4.006	102% maior

OBS: Os resultados acima referem-se exclusivamente aos corpos de prova ensaiados.

Os tecidos TEXIGLASS WR-200 e WR-326 podem ser usados na camada superficial, pois proporcionam um ótimo acabamento e não costumam marcar o gel-coat.

Propriedades Mecânicas:

- Quanto “+ TECIDO” = “+ RESISTÊNCIA”
- MÁXIMA RESISTÊNCIA = Fibras Orientadas
- Tecidos UNIDIRECIONAIS → podem ser de Urdume ou de Trama
- Tecidos “COSTURADOS” → máximo de resistência
- Tecidos “COSTURADOS” → Menos Mão de Obra (uma só laminação = várias camadas)
- Tecidos “COSTURADOS” → direcionamento a + 45° e - 45°
- Tecidos de fibra de vidro → A resistência específica (em igualdade de peso) é sempre superior a de qualquer outro material, só superada pela fibra de carbono, aramida, etc...

Tecidos de Fibra de Aramida

O reforço de plástico com tecido de fibra de aramida apresenta algumas vantagens em relação a outras fibras. Devemos sempre lembrar que a escolha da fibra a ser utilizada no plástico reforçado deve estar sempre baseada no objetivo e necessidade da aplicação final.

A fibra de aramida possui baixo peso específico se comparada a outras fibras; concilia grande resistência, rigidez e baixo peso específico permitindo o uso de menos material para se obter as mesmas características mecânicas; é resistente a rachaduras; aumenta a rigidez da estrutura; possui alta absorção de energia; possui baixo alargamento; não corrói em água doce nem salgada e é incombustível.

Além do segmento de reforço de plástico, a fibra de aramida tem diversas outras utilizações como: coletes a prova de bala, cabanas de solda, isolamento de barreira química (contra a maioria dos agentes agressivos), blindagens, sustentação de cabos de fibra ótica, confecção de almofadas, jaquetas térmicas.

Tecidos de Fibra de Carbono

Leveza, rigidez, resistência, baixa deformação térmica e satisfatória condutividade térmica. Estas são algumas das propriedades da fibra de carbono que fazem dela uma das melhores opções para fabricação de peças de plástico reforçado.

O plástico reforçado com fibra de carbono tem sua origem nos desenvolvimentos de equipamentos espaciais e é utilizada desde 1967 nesta área.

É usada também em aviões, em materiais esportivos (raquetes de tênis, tacos de golfe, varas de pesca, bicicletas), no segmento automobilístico (Fórmula 1), construção civil, e outras peças para isolamento, etc.

Tecidos de Fibra de Vidro

Os tecidos de fibra de vidro utilizados para a composição dos plásticos reforçados são estruturados nas formas unidirecionais, bidirecionais e multiaxiais em diferentes padronagens (desenhos: tela, sarja, cetim, raso turco, etc.) e diversas gramaturas (de 50 g/m² a 1500 g/m²) permitindo grande flexibilidade de aplicação, conciliando leveza, resistência à deterioração química, estabilidade dimensional, propriedades dielétricas e resistência à umidade.

ESTRUTURA SANDUÍCHE

As estruturas sanduíche, como é sabido, são constituídas com duas cascas de fiberglass (as faces sanduíche) envolvendo um núcleo de material leve, geralmente espuma de poliuretano. O dimensionamento estrutural das estruturas sanduíche consiste na determinação das espessuras do núcleo e das faces.

Quando submetidas a carregamentos laterais, as estruturas sanduíche têm uma das faces tracionada e a outra comprimida.

Essas tensões (tração em uma face, compressão na outra) são calculadas por:

$$\sigma' = \frac{(M)(cs)}{c.t} = \frac{(K_2 q a^2)(cs)}{c.t}$$

Onde:

σ' = tensão atuante

M = momento fletor

c = espessura do núcleo

A espessura das faces é dada por:

(Condição I)

$$t = \frac{(K_2 q a^2)(cs)}{\sigma' \cdot c}$$

Para cálculo das deflexões (flechas), desprezando as deformações de cisalhamento do núcleo, é necessário o conhecimento do momento de **inércia por unidade de comprimento** ("i") da estrutura.

Este é dado aproximadamente por:

$$i = \frac{c^2 t}{2}$$

Onde:

t = espessura determinada critério de rigidez

Notar que estamos desprezando as tensões do cisalhamento no núcleo. Neste caso, as estruturas sanduíches são dimensionadas de maneira muito simples.

A espessura do núcleo é dimensionada para que a estrutura sanduíche apresente a mesma deflexão que outra equivalente laminada (não sanduíche)

(Condição II)

$$\frac{c^2 t}{2} = \frac{t_1^3}{12}$$

...sendo t_1 calculada pelo critério de rigidez, para estruturas não sanduíche, pelo método teórico ou comparativo. Existem varias combinações de espessura "t" e "c" que satisfazem as **condições I e II** acima. Este problema é comumente resolvido arbitrando a espessura das faces "t" e calculando a espessura do núcleo "c" para as condições I e II, sendo o maior valor de "c" adotado para a estrutura.

MATERIAIS DE NÚCLEO

PROPRIEDADES FÍSICAS DE DIFERENTES MATÉRIAS DE NÚCLEO

Material	Densidade (g/cm ³)	Resist. Tração (kg/mm ²)	Resist.Compressão (kg/mm ²)
Coremat Antes de moldar	0,045	0,12 – 0,20	---
Moldado (impregnado)	0,70 – 0,80	0,60 – 1,00	2,2
Espuma de Poliuretano Rígida	0,024 – 0,29	0,011 – 0,49	0,011 – 0,77
Espuma de cloruro de polivinilo	0,032 – 0,095	0,09 – 0,17	0,032 – 0,18
Espuma acrílica	0,04 – 0,10	0,10 – 0,17	0,05 – 0,20
Balsa (perpendicular)	0,096 – 0,248	0,95 – 3,10	0,52 – 2,30

EXEMPLOS COMPARATIVOS DE DIFERENTES LAMINADOS

Construção do laminado	esp. mm	P.E. g/cm ³	Res.Tração (kg/mm ²)	Módulo (kg/mm ²)	Elongam. (%)	Res.Flexão (kg/mm ²)	Módulo (kg/mm ²)
resina curada	3,0	1,19	6,0	390	2,0	12,0	410
3 Mantas 450	3,0	1,43	11,6	800	1,9	18,0	770
M+T+M+T+M	4,4	1,49	14,5	1120	2,1	21,6	1030
M+C2+M	4,2	0,98	5,0	500	1,8	15,0	760
M+C2+C2+M	6,4	0,90	3,3	310	1,8	10,8	620
M+C3+C3+M	8,2	0,92	3,1	270	1,7	9,8	530
M+T+C3+C3+M	8,8	0,98	4,5	450	1,7	15,7	660
M+T+C3+M+C3+T+M	10,4	1,07	7,1	600	2,1	15,0	750
M+C4+C4+M	10,0	0,88	2,8	230	1,8	8,0	470
M+T+M+C4+ M+T+M	9,5	1,17	8,3	680	1,7	18,1	1000

M = Manta 450 g/m² - **T** = Tecido 600 g/m² - **C** = Coremat (C2=2mm) (C3=3mm) (C4=4mm)

- Diminuem consumo de resina em aproximadamente 40 %;
- Diminuem o consumo de fibras de vidro pela redução da espessura do fiberglass;
- Maior resistência;
- Reduz a flambagem em superfícies planas;
- Menor tempo de laminação para grandes espessuras;
- Alta resistência ao impacto;
- Bom desempenho como isolante térmico e acústico;

NERVURAS

É interessante observar que para a mesma resistência à flexão, a espessura requerida pelo Fiberglass é praticamente idêntica à requerida pelo aço. Porém, para a mesma rigidez os laminados de fiberglass precisam ser 3,3 vezes mais espessos.

Da observação acima, podemos concluir que para resistir aos esforços de flexão, a espessura dos laminados de Fiberglass não precisam ser muito grande. É de se esperar que, na maioria das aplicações, as peças de Fiberglass com 3,0 mm de espessura satisfaçam plenamente aos esforços de flexão. Daí resulta a justificativa teórica da regra empírica de se adotar, de saída, 3,0 mm como espessura padrão para laminados de Fiberglass.

Adotada a espessura de 3,0 mm para a casca de fiberglass, a rigidez requerida pela estrutura é obtida por nervuramento.

O dimensionamento das nervuras é feito da seguinte maneira:

- Determina-se a espessura requerida pela estrutura (método comparativo ou teórico) pelo critério de rigidez.

- Calcula-se a **inércia** dessa estrutura pela expressão:

- Em seguida é escolhida a distância entre nervuras por critérios puramente estéticos. Seja “L” a **distância entre nervuras**.

- A **inércia requerida pelas nervuras (“I”)** é simplesmente:

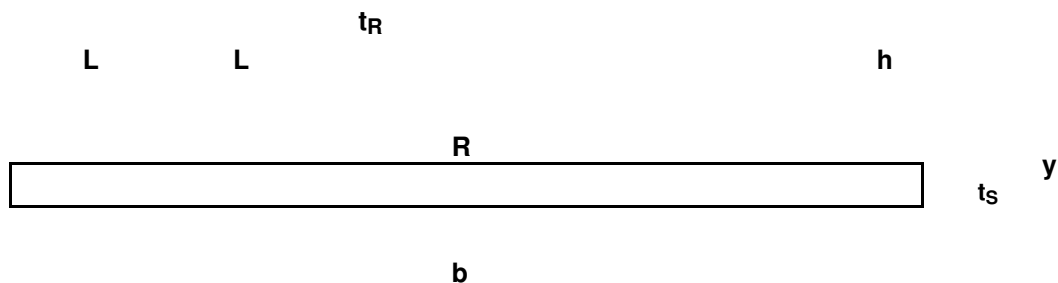
$$I = L \cdot i$$

- Conhecida a inércia, as nervuras são escolhidas consultando tabela apropriada.

Deve ser compreendido que o método acima descrito substitui a inércia da estrutura ($t^3/12$), uniformemente distribuída, por inércia de nervura (“I”). Este procedimento é, portanto, apenas uma aproximação, porque a rigidez da estrutura “atua” em todas as direções, enquanto a rigidez da nervura “atua” apenas na direção da nervura. No caso de placas retangulares apoiadas nas quatro bordas, recomendamos que o nervuramento seja feito ao longo das duas direções principais (largura e comprimento) para aproximar um pouco mais o modelo aqui sugerido ao caso real.

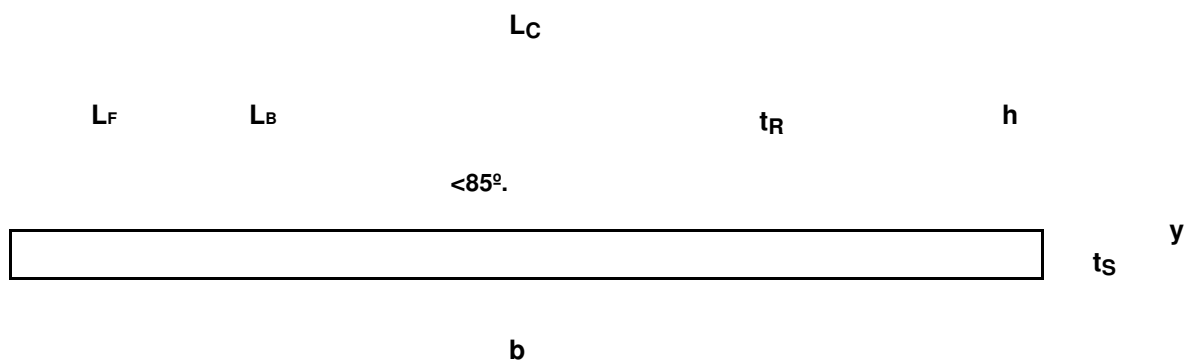
$$i = \frac{t^3}{12}$$

NERVURA MEIA-CANA



b(cm)	ts(cm)	tR(cm)	L _B (cm)	h(cm)	y(cm)	I(cm ⁴)
12	0,5	0,5	3	3	1,20	21,02
14	0,5	0,5	4	3	1,11	22,03
12	0,5	0,5	2	4	1,66	41,28
14	0,5	0,5	3	4	1,52	43,03
16	0,5	0,5	4	4	1,41	45,87
18	0,5	0,5	5	4	1,33	47,55
20	0,5	0,5	6	4	1,25	48,96
16	0,5	0,5	3	5	1,87	78,79
18	0,5	0,5	4	5	1,74	82,35
20	0,5	0,5	5	5	1,63	85,33
22	0,5	0,5	6	5	1,54	87,86
24	0,5	0,5	7	5	1,47	90,04
20	0,5	0,5	4	6	2,08	133,92
22	0,5	0,5	5	6	1,96	138,68
26	0,5	0,5	7	6	1,76	146,35
28	0,5	0,5	8	6	1,68	149,49
24	0,5	0,5	5	7	2,29	210,05
26	0,5	0,5	6	7	2,17	216,20
26	0,7	0,7	7	6	1,98	218,59
28	0,5	0,5	7	7	2,07	221,62
30	0,5	0,5	8	7	1,98	226,43
32	0,5	0,5	9	7	1,90	230,72
26	0,5	0,6	6	7	2,35	252,73
28	0,5	0,6	7	7	2,24	259,66
30	0,5	0,6	8	7	2,14	265,82
26	0,6	0,6	6	7	2,28	266,66
28	0,6	0,6	7	7	2,18	273,32
30	0,6	0,6	8	7	2,09	279,23
26	0,5	0,7	6	7	2,51	288,78
26	0,5	0,5	5	8	2,63	301,86
28	0,5	0,5	6	8	2,51	310,59
30	0,5	0,5	7	8	2,39	318,33

NERVURA TIPO CHAPÉU



b(cm)	t_s (cm)	t_r (cm)	L_b (cm)	L_c (cm)	h(cm)	y(cm)	I (cm ⁴)
9	0,5	0,5	3,0	3	3	1,10	11,20
9	0,5	0,5	3,0	3	4	1,41	23,10
10	0,5	0,5	3,5	3	4	1,34	23,08
10	0,5	0,5	3,0	4	4	1,47	26,57
11	0,5	0,5	3,5	4	4	1,41	27,44
12	0,5	0,5	4,0	4	4	1,35	28,20
14	0,5	0,5	5,0	4	4	1,25	29,40
12	0,5	0,5	3,5	5	4	1,46	30,94
13	0,5	0,5	4,0	5	4	1,40	31,77
14	0,5	0,5	4,5	5	4	1,35	32,51
9	0,5	0,5	3,0	3	5	1,75	40,53
10	0,5	0,5	3,0	4	5	1,82	46,21
11	0,5	0,5	3,5	4	5	1,73	47,79
12	0,5	0,5	4,0	4	5	1,66	49,20
14	0,5	0,5	5,0	4	5	1,53	51,57
12	0,5	0,5	3,5	5	5	1,80	53,53
13	0,5	0,5	4,0	5	5	1,72	55,04
14	0,5	0,5	4,5	5	5	1,66	56,41
15	0,5	0,5	5,0	5	5	1,60	57,64
16	0,5	0,5	5,0	6	5	1,65	63,61
9	0,5	0,5	3,0	3	6	2,11	64,14
10	0,5	0,5	3,0	4	6	2,19	72,54
11	0,5	0,5	3,5	4	6	2,08	75,14
12	0,5	0,5	4,0	4	6	1,99	77,45
14	0,5	0,5	5,0	4	6	1,84	81,38
12	0,5	0,5	3,5	5	6	2,15	83,61
13	0,5	0,5	4,0	5	6	2,06	86,09
14	0,5	0,5	4,5	5	6	1,98	88,33
15	0,5	0,5	5,0	5	6	1,91	90,35
9	0,5	0,5	3,0	3	7	2,49	94,53
16	0,5	0,5	5,0	6	6	1,97	99,20
18	0,5	0,5	6,0	6	6	1,85	103,01

EXEMPLO DE CÁLCULO

Vamos dimensionar estruturalmente uma fôrma para concreto com 1,0 m de comprimento, 0,5 m de largura e 0,3 m de profundidade, supondo camada de concreto de 15 cm sobre a forma.

Nesse caso, temos que dimensionar 3 painéis retangulares:

- Painel horizontal com 100 cm X 50 cm;
- Painel vertical com 100 cm X 30 cm;
- Painel vertical com 50 cm X 30 cm.

Não existindo estrutura similar, não podendo usar o método comparativo. Vamos então recorrer ao método teórico.

As arestas da forma de concreto devem ser reforçadas, geralmente com o dobro da espessura dos painéis. Podemos então considerar os painéis engastados nestas arestas.

Os coeficientes K_1 e K_2 para placas retangulares engastadas são extraídos da **Tabela 1** do “Método Teórico” (pág. 5).

- Painel horizontal (100 cm X 50 cm)	$b/a = 2$	$K_1 = 0,03$	$K_2 = 0,0829$
- Painel vertical (100 cm X 30 cm)	$b/a = 3,33 = 0,030$		$K_2 = 0,0833$
- Painel vertical (50 cm X 30 cm)	$b/a = 1,67$	$K_1 = 0,029$	$K_2 = 0,0799$

As cargas atuantes nas placas horizontais e verticais são obtidas pela expressão geral:

$$q = (0,1) (h) (y)$$

Sendo: q = carga uniformemente distribuída em kg/cm^2
 h = altura da coluna de concreto em metros
 y = peso específico do concreto ($2,4 \text{ g/cm}^3$)

Para o painel horizontal: $q = (0,1)(0,15)(2,4) = 0,04 \text{ kg/cm}^2$

Para os painéis verticais: $q = (0,1)(2,4) (0,45/2) = 0,05 \text{ kg/cm}^2$

Sendo: $(0,45/2)$ a altura média da coluna de concreto atuante nos painéis verticais.

Entretanto nas fórmulas teóricas com as cargas atuantes calculadas é...

$$CS = 4$$

$$\sigma' = 1900 \text{ kg/cm}^2$$

$$E' = 60000 \text{ kg/cm}^2$$

...fica fácil o cálculo das espessuras.

O cálculo é feito para os critérios de rigidez e resistência, para os painéis verticais e o painel horizontal. As expressões teóricas são as mesmas da página 5 ("Método Teórico") para placas retangulares engastadas.

CÁLCULOS:

. Painel Horizontal (100 cm X 50 cm)

- Pelo critério de **resistência**:

$$t = \frac{(6)(0,0829)(0,04)(50)^2 (4)^{1/2}}{1900}$$

$$t = 0,32 \text{ cm (3,2 mm)}$$

- Pelo critério de **deformação**:

$$t = \frac{(0,030)(0,04)(50)^4}{(60000)(0,25)^3}$$

$$\text{com } y = 50/200 = 0,25 \text{ cm}$$

$$t = 0,79 \text{ cm (7,9 mm)}$$

A deformação lateral (flecha) máxima do painel horizontal foi limitada a

$\frac{1}{200}$ do menor valor, i.é.,

$$\frac{1}{200} \cdot 50 = 0,25 \text{ cm}$$

A espessura calculada (0,32 cm) é maior que a deformação máxima, sendo a expressão teórica aplicável e o resultado correto.

Pelo critério de resistência, a espessura deve ser 3,2 mm. Porém, para que a deformação lateral (flecha) não exceda 2,5 mm, a espessura deve ser 7,9 mm.

É obvio que vamos adotar a espessura de 3,2 mm (a célebre espessura empírica) e nervurar a estrutura para satisfazer o critério de rigidez.

A inércia requerida pela nervura transversal é:

$$I = Li$$

$$I = L \cdot \frac{t^3}{12}$$

$$I = 50 \cdot \frac{(0,79)^3}{12}$$

$$I = 2,1 \text{ cm}^4$$

Trata-se de uma nervura extremamente modesta, como pode ser constatado consultando as tabelas de inércia e nervuras.

A nervura longitudinal é menor ainda, com inércia.....

$$I = 25 \cdot \frac{(0,79)^3}{12}$$

$$I = 1,0 \text{ cm}^4$$

Neste exemplo, foi considerada distância entre nervuras...

$$L = 25 \text{ cm} \text{ e } L = 50 \text{ cm}$$

...supondo apoio rígido nas arestas.

Realmente, as arestas são rígidas e esse procedimento é correto.

. Painel Vertical (100 cm X 30 cm)

resistência:

$$t = \frac{(6)(0,0833)(0,05)(30)^2(4)^{1/2}}{1900}$$

$$t = 2,2 \text{ mm (adotar 3,2 mm)}$$

rigidez:

$$\frac{(0,030)(0,05)(30)^4}{(60000)(0,15)} t =$$

$$y = \frac{30}{200} = 0,15 \text{ cm}$$

$$t = 5,1 \text{ cm}$$

Este painel pode ser construído com $t = 3,2 \text{ mm}$. A mesma nervura usada para o painel horizontal pode ser usado também neste caso.

. Painel Vertical (50 cm X 30 cm)

resistência:

$$= \frac{(6)(0,0799)(0,05)(30)^2(4)^{1/2}}{1900} t$$

$$t = 2,1 \text{ mm (adotar 3,2 mm)}$$

$$t = 5,1 \text{ cm} = 5,1 \text{ mm}$$

rigidez:

$$t = \frac{(0,029)(0,05)(30)^4}{(60000)(0,15)} \frac{1}{8}$$

$$t = 5,1 \text{ cm} = 5,1 \text{ mm}$$

Podemos, mais uma vez, adotar espessura de 3,2 mm para esse painel e a mesma nervura usada no painel horizontal.

Em resumo, o cálculo foi feito dividindo a fôrma para concreto em painéis (placas) retangulares e calculando cada um deles pelos critérios de resistência e rigidez. A espessura adotada, pelo critério de resistência, é 3,2 mm para toda a fôrma. A fôrma é nervurada com nervuras pequenas, posicionada transversal e longitudinalmente.

BIBLIOGRAFIA

- Grande parte desta literatura foi transcrita na íntegra do original

“Guia de Laminação Manual e a Pistola”

Owens-Corning – Divisão de Compósitos
Edição GL 02-12-95

- As referências dos reforços, fibras de vidro, carbono e kevlar, bem como tabelas comparativas entre reforços foram extraídas de literaturas da TEXIGLASS e FIBERTEX
Empresas de Tecidos Especiais

- As tabelas e citações sobre matérias de núcleo firam extraídas de literaturas da
FRP SERVICES & COMPANY
Fabricante do produto U-Pica Mat , aqui referenciado como Coremat.