

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROJETO DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO COM BARRAS NÃO
METÁLICAS

Beatriz Pinheiro Furukawa Godoi

São Carlos

2024

BEATRIZ PINHEIRO FURUKAWA GODOI

PROJETO DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO COM BARRAS NÃO
METÁLICAS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de São Carlos, para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de
Almeida Filho

São Carlos

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que me apoiaram em toda a minha graduação. Ao Prof. Fernando Menezes de Almeida Filho, por todo apoio e orientação durante a realização dessa pesquisa. Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários da Universidade Federal de São Carlos, pelo ambiente de ensino que tornou possível a conclusão desse trabalho.

RESUMO

As lajes de concreto armado são elementos muito comuns nos diversos tipos de construções. Em geral, sua armadura é composta por barras de aço, que possuem alta resistência à tração, suprimindo a deficiência do concreto quanto a resistência a esse esforço. No entanto, esse material também possui algumas desvantagens, sendo a sua suscetibilidade a corrosão e alto peso próprio duas das mais evidentes. Dessa maneira, materiais alternativos ganham cada vez mais espaço no mercado, que busca melhores desempenhos com menos gastos de recursos. Nesse contexto, as barras de polímeros reforçadas com fibras de vidro (GFRP) vêm sendo estudadas como substitutas as armaduras de aço nas lajes de concreto, devido a suas vantagens como baixo peso próprio, alta resistência a corrosão e versatilidade de geometria e propriedades mecânicas. Portanto, nesse trabalho, foi realizada a análise estrutural de lajes de concreto armadas com barras GFRP. Para isso, criou-se modulações de lajes com diferentes valores de f_{ck} , vão e classe de agressividade ambiental. A partir dessas modulações, foram realizados os seus dimensionamentos, sendo possível, dessa forma, a comparação entre o peso de armadura e consumo de concreto entre lajes armadas com GFRP e aço convencional, visando analisar a possível redução na utilização de recursos e a viabilidade desse novo material no mercado atual. Como resultados, foi encontrado que as lajes com armaduras de barras de fibra de vidro apresentam valores similares as lajes armadas com aço, principalmente para vãos menores, o que mostra que ela é uma alternativa promissora para o dimensionamento de estruturas.

Palavras-chave: Barras de fibra de vidro. Barras não metálicas. Concreto armado. GFRP. Lajes armadas.

ABSTRACT

Reinforced concrete slabs are very common elements across the various types of constructions. In general, their reinforcement is made up of steel bars, which possess high tensile strength, compensating for concrete's deficiency in resisting such force. However, this material also has some disadvantages, with its susceptibility to corrosion and high self-weight being two of the most prominent. Consequently, alternative materials are increasingly gaining traction in the market, which aims for improved performance with reduced resource expenditure. In this context, glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars have been under study as substitutes for steel reinforcement in concrete slabs due to their advantages such as low self-weight, high corrosion resistance, and versatility in geometry and mechanical properties. Therefore, this work undertook the structural analysis of concrete slabs reinforced with GFRP bars. To achieve this, slab modulations with different values of f_{ck} , spans, and environmental aggressiveness class were created. Based on these modulations, their dimensions were carried out, making it possible to compare the weight of reinforcement and concrete consumption between slabs reinforced with GFRP and conventional steel, aiming to analyze the possible reduction in the use of resources and the viability of this new material in the current market. As a result, it was found that slabs reinforced with fiberglass bars have similar values to slabs reinforced with steel, especially for smaller spans, which shows that they are a promising alternative for structural design.

Keywords: Glass fiber bars. Non-metallic bars. Reinforced concrete. GFRP. Reinforced slabs

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista transversal das barras GFRP	15
Figura 2 – Diagrama de tensão-deformação no estágio I	21
Figura 3 - Diagrama de tensão-deformação no estágio II	21
Figura 4 - Diagrama de tensão-deformação no estágio III	22
Figura 5 - Diagrama de tensão-deformação retangular equivalente no estágio III	22
Figura 6 – Representação esquemática da interface do compósito.....	24
Figura 7 – Processo de fabricação de barras GFRP	26
Figura 8 – Laje tipo.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-mecânicas dos tipos de fibras de vidro	25
Tabela 2 – Coeficiente de expansão térmica de barras de aço, GFRP e concreto	28
Tabela 3 - Modelos analisados no trabalho	38
Tabela 4 – Valores de cobrimento nominais correspondentes as classes de agressividade ambiental.....	39
Tabela 5 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo ACI 440-1R (2015).....	41
Tabela 6 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo ACI 440-1R (2015).....	42
Tabela 7 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo IBRACON (2021)	42
Tabela 8 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo IBRACON (2021)	43
Tabela 9 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo NBR 6118 (2023)	43
Tabela 10 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo NBR 6118 (2023).....	44
Tabela 11 – Tabela comparativo do modelo A	45
Tabela 12 – Tabela comparativa do modelo B.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_c - área da seção transversal de concreto

A_f – área da armadura de GFRP

A_s – área da armadura de aço

b_w – largura da seção transversal da laje

c_b – distância da fibra mais comprimida a linha neutra na condição de tensão equilibrada

C_E – fator de redução ambiental

c_{nom} – cobrimento nominal da armadura

cob – cobrimento

d – altura útil da laje

E_{cs} – módulo de deformação secante do concreto

E_f – módulo de elasticidade do GFRP

E_{si} – módulo de elasticidade do aço

f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto

$f_{ct,m}$ – resistência média a tração do concreto

$f_{ctk,sup}$ – resistência característica superior do concreto a tração

f_{fd} – resistência ao escoamento de cálculo de GFRP

f_{fk} – resistência ao escoamento característica de GFRP

$f_{fs,sus}$ – nível de tensão induzido pela carga de serviço sustentada

f_{yd} – resistência ao escoamento de cálculo do aço

f_{yk} – resistência ao escoamento característica do aço

g_1 – cargas permanentes

g_2 – cargas permanentes

h - espessura da laje

I_0 – momento de inércia da seção

I_c – momento de inércia da seção bruta

I_{cr} – momento de inércia da seção fissurada

I_{II} – momento de inércia da seção fissurada do concreto no estágio II

I_m – momento de inércia médio

k – razão entre a profundidade da linha neutra e a profundidade do reforço

k_b – coeficiente que depende do tipo de ligação

KMD – coeficiente adimensional para o cálculo da armadura

k_x – coeficiente de cálculo baseado no valor de λ

k_y – coeficiente de cálculo baseado no valor de λ

KZ – coeficiente adimensional para o cálculo da armadura

ℓ_x - menor vão livre da laje

ℓ_y - maior vão livre da laje

M_r – momento de fissuração

M_{rd} – momento fletor resistente de cálculo

$M_{s,sus}$ – momento devido a cargas de serviço sustentadas

M_{sd} – momento fletor solicitante de cálculo

M_{sk} – momento fletor solicitante característico

M_u – Momento da laje

n – número de barras por metro

n_f – razão entre o módulo de elasticidade do concreto e o módulo do GFRP e do módulo de elasticidade do concreto

n_{total} – número de barras total na laje

ϕ - diâmetro da armadura longitudinal

P_{ELS-CF} – combinação frequente de serviço

$P_{ELS-CQP}$ - combinação quase permanente de serviço

P_{ELS-CR} – combinação rara de serviço

$P_{ELU-NORMAL}$ – combinação última normal

q – cargas variáveis

s – espaçamento entre barras

$s_{m\acute{a}x}$ – espaçamento máximo entre barras

V_C – força cortante nominal fornecida pelo concreto

V_{sd} – esforço cortante de cálculo

V_{sk} – cortante solicitante característica

w_k – abertura de fissura

$w_{k,lim}$ – limite máximo de abertura de fissura

x – profundidade da linha neutra

x_{II} – profundidade da linha neutra no estágio II

y_t – distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada

α – coeficiente

α_c – parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão

α_f – coeficiente de dilatação térmica da barra de FRP

β – razão entre a distância da linha neutra a fibra mais tensionada e a distância entre a linha neutra e o centro de tensão reforçado

β_1 – fator tomado como 0,85 para concretos com resistência de cálculo à compressão de até 28 MPa

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

γ_g – coeficiente de ponderação para cargas permanentes

γ_m – coeficiente de ponderação da resistência das barras de aço e GFRP

γ_q – coeficiente de ponderação para cargas variáveis

$\delta_{\text{ELS-CQP},\infty}$ – flecha diferida no tempo

$\delta_{\text{ELS-CQP},\text{fiss}}$ – flecha fissurada

$\delta_{\text{ELS-CQP},\text{ini}}$ – flecha imediata

δ_{lim} – flecha limite

ϵ_{cu} – deformação última do concreto a compressão

λ – coeficiente para profundidade do bloco retangular de tensões na laje

λ – índice de esbeltez

μ_x – coeficiente de cálculo baseado no valor de λ

μ_y – coeficiente de cálculo baseado no valor de λ

ρ_{ef} – taxa de armadura efetiva

ρ_f – taxa de armadura

$\rho_{f,\text{ts}}$ – razão de reforço para temperatura e encolhimento

ρ_{fb} – taxa de armadura balanceada

σ_{fd} – tensão na armadura

$\sigma_{\text{si-cf}}$ – tensão na armadura no estágio II para combinação frequente

$\sigma_{\text{si-cqp}}$ – tensão na armadura no estágio II para combinação quase permanente

T_b – tensão de aderência nominal

Ψ_1 – fator de redução de combinação frequente de serviço

Ψ_2 – fator de redução de combinação quase permanente de serviço

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. JUSTIFICATIVA.....	16
1.2. OBJETIVOS	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. PROJETO DE LAJES	18
2.2. CONCRETO ARMADO	19
2.2.1. Estados limites	20
2.2.2. Estádios.....	20
2.3. BARRAS DE AÇO.....	23
2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS	24
2.4.1. Polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP).....	25
2.4.2. Processo de fabricação das barras de GFRP	26
2.4.3. Propriedades mecânicas das barras de GFRP	26
2.4.4. Propriedades físicas das barras de GFRP	27
2.4.5. Vantagens e desvantagens	28
2.5. MODELO DE CÁLCULO.....	29
2.5.1. Princípios gerais e hipóteses básicas	29
2.5.2. Lajes armadas com barras de aço	30
2.5.3. Lajes armadas com GFRP conforme IBRACON (2021)	32
2.5.4. Lajes armadas com GFRP conforme ACI 440-1R (2015)	34
2.5.5. Consumo de concreto e de armadura	36
3. METODOLOGIA.....	37
3.1. PARÂMETROS DE PROJETO.....	37
3.2. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS.....	39
4. RESULTADOS.....	41
4.1. ARMADURAS DIMENSIONADAS	41
4.2. COMPARATIVO ENTRE AS LAJES.....	45
5. CONCLUSÕES	51
5.1. PROPOSTAS DE PESQUISAS FUTURAS.....	52
REFERÊNCIAS.....	53
ANEXO A – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DA NBR 6118 (2023).....	55
ANEXO B – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DA NBR 6118 (2023).....	59

ANEXO C – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DO IBRACON (2021)	64
ANEXO D – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DO IBRACON (2021)	68
ANEXO E – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DO ACI 440-1R (2015)	73
ANEXO F – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DO ACI 440-1R (2015)	77

1. INTRODUÇÃO

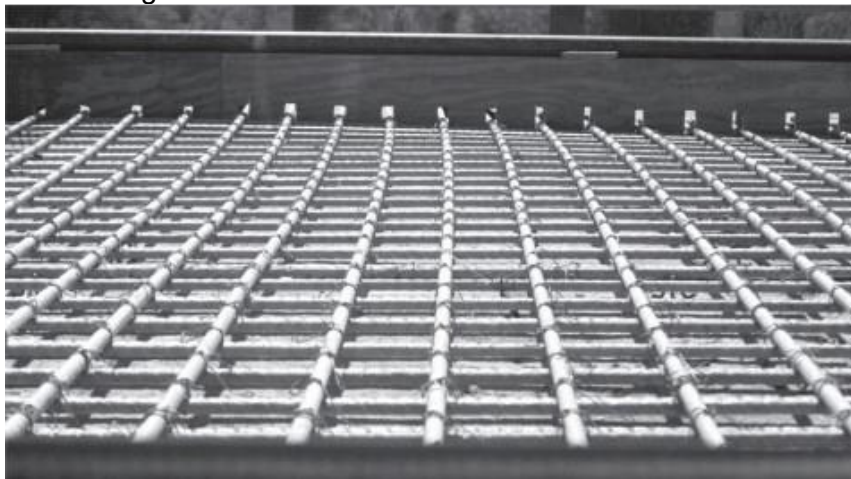
As lajes são elementos de superfície, bidimensionais e planas. Isso implica que duas de suas dimensões, a largura e o comprimento, são de mesma grandeza e muito maiores do que uma terceira dimensão, a espessura. Elas também são denominadas como placas e, em geral, recebem as maiores parcelas dos carregamentos verticais nos edifícios, transferindo estes para outros elementos. Normalmente são construídas em concreto armado, podendo apresentar diferentes geometrias (Bastos, 2023).

Com origens no século XIX, o concreto armado é um dos tipos de materiais mais utilizado na construção civil. Esse sistema construtivo é composto por elementos de concreto reforçados internamente com barras de aço, que suprem a sua deficiência quanto à resistência a esforços de tração. Assim, essa técnica proporcionou uma otimização ao concreto, tornando possível a sua utilização em diversas estruturas, incluindo as lajes (Porto; Fernandes, 2015).

No entanto, a utilização de barras de aço possui algumas desvantagens, sendo a sua suscetibilidade à corrosão uma das suas limitações mais evidentes. Outra desvantagem desse material é o seu elevado peso próprio, o que pode levar ao excesso de peso na laje, causando problemas como trincas e fissuras, além de dificultar o seu transporte e movimentação em obra. Dessa forma, é buscado cada vez mais no mercado materiais que possam ser utilizados como alternativas ao aço.

Nesse contexto, as barras de polímeros reforçadas com fibras de vidro (GFRP) vem sendo estudadas como substitutas as armaduras de aço convencional. Essas barras são compostas por fibras de vidro mergulhadas em resinas poliméricas, sendo mais comumente epóxi, fenólica ou éster vinílica. Apesar de não existir uma norma brasileira, já existem algumas normas internacionais para esse material, como a canadense, a japonesa e a americana. Na Figura 1 são apresentadas barras de GFRP utilizadas para a construção da ponte Sierrita de la Cruz Creek (ACI 440-1R, 2015).

Figura 1 – Vista transversal das barras de GFRP



Fonte: ACI 440-1R (2015)

Algumas de suas vantagens são baixo peso próprio e resistência à corrosão elevada, tornando-a uma opção para ambientes com condições adversas. Essas características também levam a uma maior facilidade no manuseio e redução nos custos de transporte, montagem e manutenção. Além disso, outras vantagens desse material são a baixa condutividade térmica, a versatilidade de geometria e propriedades mecânicas e o baixo impacto ambiental (Instituto Brasileiro de Concreto, 2021).

Devido a essas características, as barras de GFRP apresentam diversas aplicações, podendo ser utilizadas para o reforço de estruturas nas fases de construção ou restauração. Entretanto, elas também apresentam algumas desvantagens, sendo uma delas a falta de normas brasileiras que possam reger e padronizar a sua utilização no país. Outras desvantagens são a falta de conhecimento quanto ao seu comportamento em relação ao fogo, a impossibilidade de realizar dobras nesse material em obra e a instabilidade dos perfis (Correia, 2012).

Dessa maneira, este trabalho teve como foco de estudo o dimensionamento e a análise de diferentes modulações de lajes de concreto armadas com barras de fibra de vidro em comparação as lajes reforçadas com aço convencional. Para a realização dessa análise, foram usadas normas brasileiras e internacionais, assim como informações da literatura. Buscou-se ainda realizar uma comparação do consumo de concreto e de armadura destas lajes para fins de avaliação da sua viabilidade no mercado atual.

1.1. JUSTIFICATIVA

Com o avanço do setor de construção civil e de suas técnicas construtivas, novos materiais são procurados no mercado, visando melhores desempenhos e economia de recursos. As barras de polímeros reforçadas com fibras de vidro mostram-se promissoras como substitutas as armaduras de barras de aço, apresentando maior resistência a corrosão e menor peso próprio. No entanto, ainda não há no Brasil normas que regularizam sua prática, dificultando a propagação e popularização desse material (Ineia *et al.*, 2021).

A partir da realização de planilhas para o dimensionamento de lajes de diferentes modulações armadas com aço e com fibras de vidro, é possível analisar o seu desempenho e as vantagens na utilização desse material em termos de capacidade estrutural. Assim, o desenvolvimento de trabalhos baseados na análise estrutural de projetos de lajes compostas por armaduras de GFRP auxilia no entendimento do seu comportamento e particularidades, contribuindo dessa forma para o futuro desenvolvimento de normas técnicas a respeito de estruturas de concreto armado com GFRP.

Ademais, a comparação entre o consumo de concreto e de armadura de lajes armadas com as barras de GFRP e com o aço convencional permite analisar se esse material traz uma redução na utilização de recursos, tornando a sua utilização viável e causando menor impacto ambiental.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos gerais do trabalho foram a análise do comportamento de lajes de concreto reforçadas com barras de fibra de vidro e a comparação desse sistema construtivo às lajes armadas com barras de aço. Os objetivos específicos foram:

- Criação de diferentes módulos de lajes com armaduras compostas por fibras de vidro, em que são variados o f_{ck} do concreto, o vão das lajes e a classe de agressividade ambiental;
- Avaliação do comportamento estrutural das lajes com armaduras de GFRP;

- Realização da comparação do consumo de concreto e de armadura desses modelos com lajes de mesmos parâmetros armadas com barras de aço;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, são apresentadas informações presentes na literatura a respeito dos temas abordados neste trabalho, para melhor entendimento e contextualização. São também apresentados os procedimentos de cálculo que foram seguidos para a obtenção dos resultados e para o desenvolvimento das análises propostas.

2.1. PROJETO DE LAJES

As lajes são elementos estruturais planos dimensionadas para receber cargas verticais permanentes e acidentais provenientes do uso de uma edificação, como pessoas, máquinas, equipamentos, paredes, entre outros. Esses elementos são essencialmente submetidos a esforços de flexão, momentos fletores e forças cortantes, podendo também possuir outras funções como contraventamento de estruturas. As lajes podem ser classificadas de inúmeras formas, como pelo seu tipo construtivo, forma geométrica, tipo de vínculos nos apoios e quanto à direção.

Em relação ao seu tipo construtivo, elas podem ser divididas em lajes moldadas *in loco* ou pré-fabricadas. As lajes moldadas *in loco* são divididas em maciças e nervuradas, enquanto as pré-fabricadas são divididas em nervuradas com vigotas pré-fabricadas e em painéis (Silva, 2005). Neste trabalho, serão abordadas somente as lajes maciças.

As lajes maciças são aquelas compostas por concreto armado de mesma espessura em toda a sua superfície. Quando a relação entre o seu maior e menor lado é maior ou igual a dois, elas apresentam comportamento unidirecional e são armadas em uma direção. Caso contrário, apresentam comportamento bidirecional e são armadas em duas direções. Esse tipo de laje normalmente possui entre 8 e 15 centímetros de espessura, sendo a mais utilizada para edifícios de múltiplos pavimentos e edificações de grande porte, podendo ser apoiadas em pilares, vigas e em paredes de concreto ou alvenaria estrutural.

Para o dimensionamento das lajes maciças, é preciso determinar uma série de parâmetros, como vão livre, esforços solicitantes, deformação na laje e armadura necessária. Para a definição dos esforços solicitantes, um critério

importante a ser escolhido é o tipo de apoio. Assim, os três tipos usuais são apoio simples e engaste perfeito, que podem ser calculados de forma manual, e engaste elástico, que é calculado através metodologias que empregam *softwares*.

Outro aspecto importante para o seu dimensionamento é a definição das ações ou carregamentos atuantes nas lajes. Para isso, é necessário realizar o levantamento das cargas permanentes e acidentais, que dependem dos materiais utilizados na estrutura, de qual ocupação ela terá e do local onde ela será construída. É preciso também consultar as normas existentes para as lajes para assegurar que todas as etapas sejam feitas de forma correta (Bastos, 2023).

A definição das armaduras também é de extrema importância para garantir a integridade e o bom funcionamento da construção. Alguns dos parâmetros a serem definidos é a quantidade e material a ser utilizado na armadura, que normalmente é constituída por barras de aço. Contudo, devido ao avanço e desenvolvimento do setor da construção civil, novos materiais vêm sendo estudados, incluindo as barras de polímeros reforçadas por fibras de vidro. A partir da definição dos parâmetros a serem utilizados na laje, é possível realizar o seu dimensionamento e as verificações de uso, com base em normas existentes.

2.2. CONCRETO ARMADO

O concreto armado é um sistema construtivo amplamente utilizado, formado por concreto reforçado internamente por uma armadura, mais comumente composta por barras ou fios de aço. As diretrizes para a realização de estruturas de concreto armado no Brasil são ditadas pela NBR 6118 (2023), onde são apresentados critérios e conceitos importantes para o projeto dessas estruturas. Dentre esses conceitos, dois relevantes para o presente trabalho são os estados limites e os estádios do concreto.

2.2.1. Estados limites

No dimensionamento de estruturas de concreto armado, é importante garantir a sua integridade estrutural. Para isso, são realizadas as verificações quanto ao estado-limite último (ELU) e o estado-limite de serviço (ELS). Segundo a NBR 6118 (2023), o ELU é relacionado ao colapso ou qualquer outra forma de ruína estrutural, que quando não atendido impossibilita a utilização da estrutura. Algumas das verificações realizadas nesse estado são: perda de equilíbrio estrutural, esgotamento da capacidade resistente da estrutura e colapso progressivo.

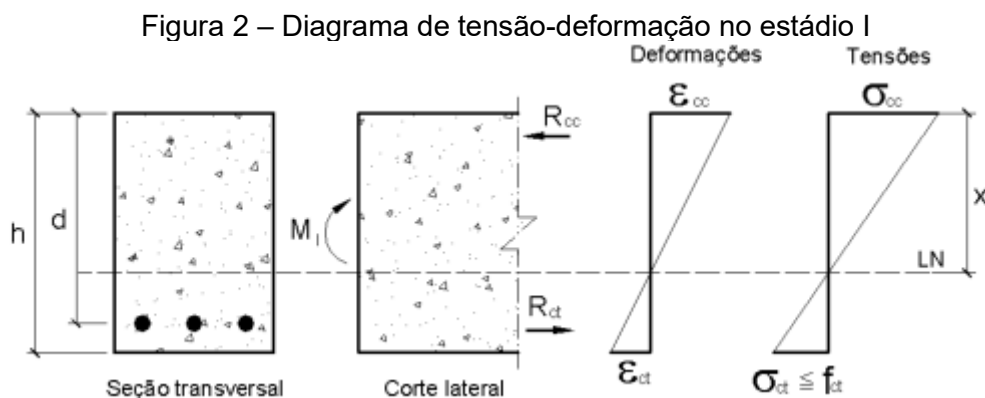
Já o ELS é relacionado ao conforto do usuário e a durabilidade, aparência e boa utilização da estrutura. De acordo com a NBR 6118 (2023), a estrutura pode exigir a verificação quanto:

- ELS-F: estado em que se inicia a abertura de fissuras;
- ELS-W: estado em que as aberturas de fissuras possuem valores iguais aos máximos permitidos pela NBR 6118 (2023);
- ELS-DEF: estado-limite de deformações excessivas, alcançado quando as deformações atingem os valores limites delimitados pela NBR 6118 (2023);
- ELS-D: estado-limite de descompressão, atingido quando um ou mais pontos da seção transversal possui tensão normal nula;
- ELS-DP: estado-limite de descompressão parcial, na qual existem esforços de compressão na parcela em que se encontram as armaduras passivas;
- ELS-CE: estado-limite de compressão excessiva, na qual as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido;
- ELS-VE: estado-limite de vibrações excessivas, na qual as vibrações atingem os limites convencionais de utilização;

2.2.2. Estádios

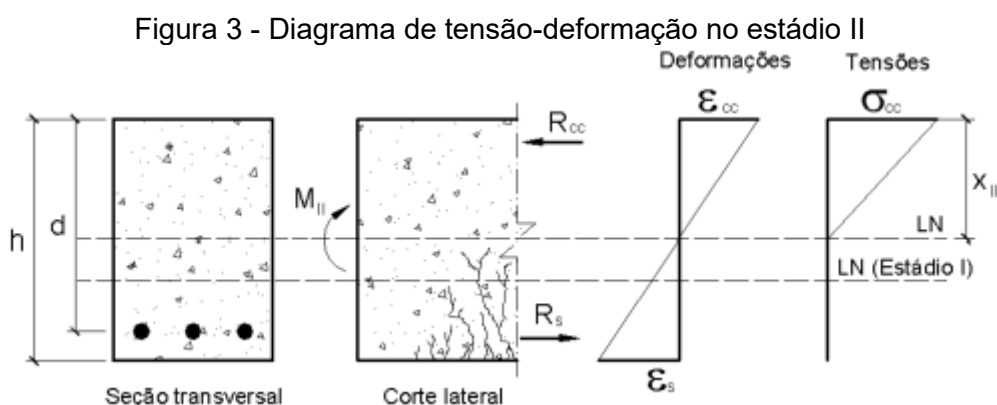
Quando um carregamento é aplicado sobre uma estrutura de concreto, esta pode passar por três estádios: estágio I, estágio II e estágio III. O estágio I ocorre do início da aplicação do carregamento até o início do aparecimento de fissuras. Nele, o concreto resiste a esforços de tração, sendo válida a Lei de

Hooke para deformações. O diagrama de tensão-deformação no estágio I é linear, conforme Figura 2, e os esforços são utilizados para a determinação do momento de fissuração, da qual pode ser calculada a armadura mínima (Custódio, 2018).



Fonte: Pinheiro (2007).

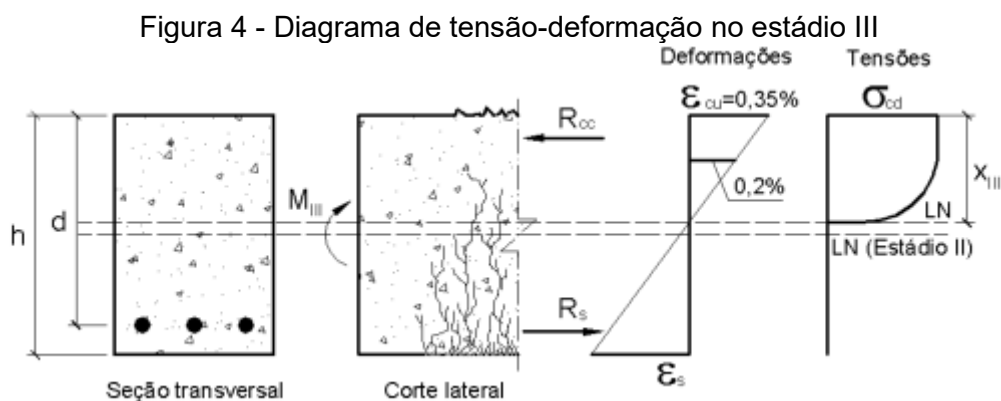
O estágio II ocorre do início do aparecimento de fissuras até a fissuração de toda a parte tracionada, terminando antes do início da plastificação do concreto comprimido. Neste estágio, o concreto não resiste mais a tração. Entretanto, na parte comprimida o diagrama permanece linear, como é representado na Figura 3, sendo válida a lei de Hooke. Este estágio é utilizado para a realização das verificações do estado-limite de serviço (Custódio, 2018).



Fonte: Pinheiro (2007).

O estágio III ocorre quando a região comprimida está plastificada. Neste caso, a estrutura sofreu ou está na iminência da ruptura. No estágio III, o

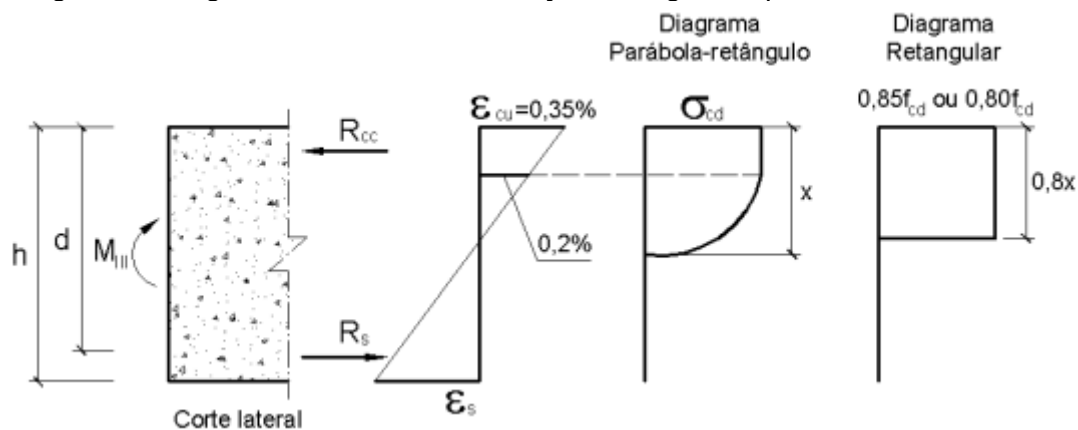
diagrama de tensão-deformação não é mais linear, possuindo a forma parabólica-retangular, conforme Figura 4 (Custódio, 2018).



Fonte: Pinheiro (2007).

Para a realização dos cálculos, a NBR 6118 (2023) permite a utilização de um diagrama linear equivalente, com altura $0,8x$, como é apresentado na Figura 5 (Custódio, 2018).

Figura 5 - Diagrama de tensão-deformação retangular equivalente no estágio III



Fonte: Pinheiro (2007).

No estágio III, as estruturas são dimensionadas para o estado-limite último. Ou seja, é realizado o dimensionamento à ruptura (Pinheiro, 2007).

2.3. BARRAS DE AÇO

As barras de aço são amplamente utilizadas no Brasil em diferentes setores da economia, incluindo a construção civil. Nesse setor, o aço possui diversas funções, como na composição de armaduras de concreto para lajes, pilares, fundações, entre outros elementos estruturais. Esse material possui massa específica de 7800 kg/m^3 e um módulo de elasticidade de cerca de 200 GPa. Geralmente, as barras de aço são encontradas em três classes de acordo com a sua resistência característica à tração, sendo elas CA 25, CA 50 e CA 60.

O aço CA 25, com resistência à tração mínima de 250 MPa, corresponde a vergalhões de superfície lisa e barras retas, mais comumente utilizado em elementos não estruturais. O aço CA 50, que possui uma resistência à tração mínima de 500 MPa, é caracterizado pela superfície nervurada, sendo mais utilizado em concreto armado. Já o aço CA 60, com uma resistência à tração mínima de 600 MPa, também possui superfície nervurada e é mais utilizado em elementos pré-moldados (Paiva *et al.*, 2023).

Em relação a sua utilização como armaduras de lajes, a alta resistência à tração do aço representa uma grande vantagem, visto que o concreto é deficiente quanto à resistência a esse esforço. Além disso, a grande quantidade de normas que dizem respeito à fabricação e utilização de aço existentes no país é outra vantagem da utilização desse material, pois confere mais segurança e garantia ao consumidor. Outras propriedades do aço que são vantajosas para elementos estruturais são a sua ductibilidade, tenacidade, elasticidade e plasticidade.

Contudo, o aço também possui algumas desvantagens. Uma delas é a sua suscetibilidade a corrosão, o que compromete a integridade da estrutura e limita a sua utilização em ambientes úmidos ou agressivos. Outra desvantagem é a fadiga do aço, que está ligado à sua qualidade e depende de diversos fatores, podendo comprometer a segurança e durabilidade dos elementos estruturais. Ademais, o peso próprio elevado desse material também configura uma desvantagem, implicando em uma maior carga a ser suportada pelos elementos (Paiva *et al.*, 2023).

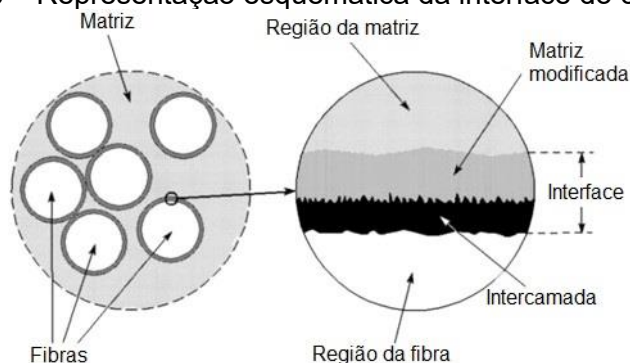
2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são produzidos artificialmente através da combinação de dois ou mais materiais distintos com o intuito de possuir as melhores características de cada material que os compõem. No caso de compósitos com dois componentes, um deles é chamado de reforço e é envolvido pelo outro, chamado de matriz. Como um exemplo desses tipos de compósitos tem-se os polímeros reforçados com fibras (FRP).

Nas barras de FRP, as fibras constituem a parcela de reforço, sendo vidro, carbono e aramida as mais comuns. Já a matriz é composta pela resina polimérica, usualmente epóxi, fenólica ou éster vinílico. Uma característica importante desse material é a anisotropia, ou seja, a direção da aplicação das tensões afeta o seu desempenho. (Instituto Brasileiro de Concreto, 2021).

Além disso, a interação da fibra com a interface também tem um papel importante para as propriedades do compósito, sendo a interface uma região de três dimensões que engloba tanto a área de contato entre a fibra e a matriz, quanto a região de espessura finita que se estende em ambos os lados dos dois componentes, conforme é apresentado na Figura 6 (Ray; Rathorne, 2014).

Figura 6 – Representação esquemática da interface do compósito



Fonte: Adaptado de Ray e Rathorne (2014).

O desenvolvimento desses materiais compósitos poliméricos, como as barras de polímeros reforçadas com fibras, teve início após a segunda guerra mundial, na década de 1940, devido a demanda no mercado consumidor por materiais de baixo custo. No entanto, foi apenas da década de 1960 que esse material passou a ser visto como uma alternativa viável para o reforço de estruturas de concreto. Atualmente, as barras de FRP são utilizadas em diversas

obras em diferentes países, como a Emma Park Bridge, em Utah, e Magog Bridge, em Quebec (ACI 440-1R, 2015).

2.4.1. Polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP)

Uma das alternativas para o reforço dos compósitos de FRP são as fibras de vidro. Sua utilização dá origem a um material conhecido como polímero reforçado com fibras de vidro ou GFRP. Tais fibras possuem o diâmetro na ordem de micrómetros e são combinadas em mechas de filamentos, que são transformados em mantas de reforço com formatos variados dependendo da orientação das fibras. Os vidros utilizados nesses materiais são óxidos metálicos formados por sílica, inorgânicos e amorfos, apresentando diversos subtipos de acordo com a sua composição.

Os principais subtipos de fibras de vidro utilizadas para a fabricação de FRP são as fibras E (*Electrical*), com baixa condutividade térmica; S (*Strength*), com alta resistência; C (*Chemical*), com alta resistência química; AR (*Alkali resistant*), com alta resistência aos álcalis; ECR (*Electrical chemically resistant*), com alta resistência à ambientes ácidos; A (*Alkali*), com alto teor de metais alcalinos, vidro de cal e sódio; M (*Modulus*), com alta elasticidade; e D (*Dielectric*), com baixa constante dielétrica. Os valores típicos aproximados das propriedades de alguns dos subtipos são apresentados na Tabela 1 (Correia, 2012; Moura, 2021).

Tabela 1 – Propriedades físico-mecânicas dos tipos de fibras de vidro

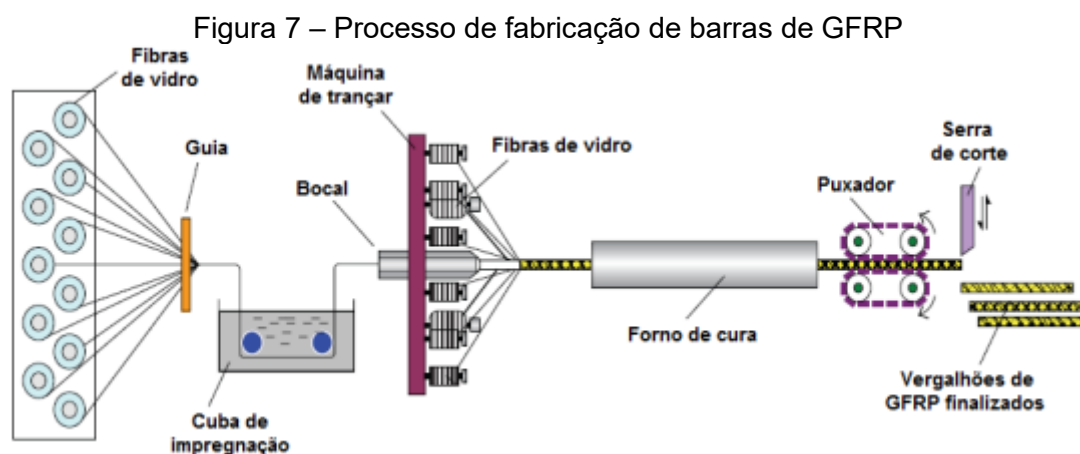
Propriedades	Tipos de Fibras de Vidro		
	E	ECR	AR
Massa específica (kg/m ³)	2540,0	2660,0	2600,0
Resistência à tração (MPa)	3100,0	3100,0	3100,0
Módulo de elasticidade (GPa)	76,0	80,0	72,0
Deformação na ruptura (%)	4,5	4,5	2,0
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	4,9	5,9	7,5

Fonte: Moura (2021).

2.4.2. Processo de fabricação das barras de GFRP

As barras de polímeros reforçadas com fibras de vidro são mais comumente fabricadas através do processo de pultrusão. Nesse processo, as fibras e as mantas de reforço de vidro são carregadas por meio de uma máquina em direção a uma cuba de impregnação, passando pela guia, que possui a função de manter o reforço no seu devido lugar. Na cuba de impregnação, a resina polimérica é injetada nas fibras, formando o conjunto de fibras e resina.

Em seguida, esse conjunto é passado por um molde circular aquecido, que irá conferir a elas a forma e a cura desejadas. Esse material é então puxado por um sistema de tração em direção a serra diamantada para a realização do corte em seções com tamanhos específicos. Na Figura 7, é apresentado um esquema da fabricação de barras de GFRP pelo processo de pultrusão (Correia, 2012; Moura, 2021).



Fonte: Moura (2021).

Além da fabricação pelo processo de pultrusão, essas barras podem ser modeladas manualmente, através da sobreposição de várias mantas de fibras de reforço, ligadas umas às outras por meio de uma resina polimérica (Correia, 2012).

2.4.3. Propriedades mecânicas das barras de GFRP

As propriedades mecânicas das barras de GFRP podem ser caracterizadas em quatro diferentes níveis de acordo com o tipo de análise

realizada: nível da fibra, da camada, da seção e do laminado. Por ser um material composto por dois materiais distintos, suas propriedades dependem tanto da matriz, quanto do reforço, sendo afetadas por fatores como a natureza e orientação das fibras e da resina e a interação entre essas duas parcelas do material (Correia, 2012).

As barras de GFRP tem, em geral, uma resistência à tração superior à do aço, com valores variando entre 400 e 1000 MPa. No entanto, possuem um módulo de elasticidade baixo, com valores típicos entre 22 e 65 GPa, demonstrando um comportamento frágil contrário ao comportamento dúctil do aço (Instituto Brasileiro de Concreto, 2021). Quanto a sua resistência a compressão, os valores usuais são inferiores aos valores de resistência à tração. Isso se deve ao fato de a tração ser resistida principalmente pelas fibras de vidro, enquanto a compressão é resistida na sua maior parte pela matriz polimérica (Moura, 2021).

2.4.4. Propriedades físicas das barras de GFRP

De acordo com o IBRACON (2021), as barras de GFRP tem o valor típico de massa específica de 2200 kg/m^3 , que representa menos de 30% da massa específica típica das barras de aço, configurando-se como um material muito mais leve. Algumas outras propriedades físicas também possuem valores definidos pela norma americana da ASTM D7975. Uma delas é a fração mássica das fibras de vidro, que corresponde a relação entre a massa das fibras e do vergalhão, cujo valor mínimo é de 70% (ASTM, 2022).

A ASTM (2022) define ainda que os vergalhões de GFRP devem apresentar uma cura mínima de 95%. Outra propriedade física importante é o coeficiente de expansão térmica (CET), que mede a variação de comprimento ou volume quando um determinado material sofre uma variação de temperatura (MOURA, 2021). Na tabela 2, são apresentados os valores de CET do concreto e de barras de aço e GFRP encontrados na literatura (IBRACON, 2021) e através de ensaios realizados por Aydin (2018) em laboratório.

Tabela 2 – Coeficiente de expansão térmica de barras de aço, GFRP e concreto

Material	CET na literatura (1°C) (Longitudinal)	CET na literatura (1°C) (Transversal)	CET experimental (1°C) (Longitudinal)	CET experimental (1°C) (Transversal)
Concreto	$7-14 \times 10^{-6}$	$7-14 \times 10^{-6}$	8×10^{-6}	$6-8 \times 10^{-6}$
Aço	$11,7 \times 10^{-6}$	$11,7 \times 10^{-6}$	$11,3 \times 10^{-6}$	$11,3 \times 10^{-6}$
GFRP	8×10^{-6}	22×10^{-6}	$4,43 \times 10^{-6}$	$22,5 \times 10^{-6}$

Fonte: Aydin (2018).

De acordo com Aydin (2018), para a obtenção de tais valores experimentais, foram utilizadas cinco barras de GFRP de 10 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, produzidas através do processo de pultrusão. Essas barras foram submetidas ao aquecimento em um forno e resfriamento em um freezer e, após atingir a temperatura desejada, foram realizadas as medições e obtidos os resultados apresentados.

2.4.5. Vantagens e desvantagens

Dentre as vantagens das barras reforçadas com fibras de vidro, a sua alta resistência a corrosão destaca-se como uma das mais importantes, uma vez que torna possível a sua utilização em ambientes agressivos, alcalinos ou úmidos. Outra vantagem é o seu baixo peso próprio, que facilita seu manejo e instalação e acarreta menor carga nos sistemas estruturais. Essas barras também possuem elevada resistência a fadiga e demandam pouca manutenção ao longo da sua vida útil.

Além disso, algumas outras vantagens que podem ser citadas são a sua baixa condutividade térmica, que impede a propagação de calor e chamas em situações de incêndios, seu baixo impacto ambiental e sua versatilidade de geometria e propriedades mecânicas (Instituto Brasileiro de Concreto, 2021; Rosa, 2016). No entanto, as barras de GFRP também possuem algumas desvantagens, sendo uma delas o custo ligado à sua produção, que apresenta preços pouco competitivos em relação aos materiais tradicionalmente usados para armaduras (Correia, 2012).

Outras desvantagens são a sua reduzida rigidez, que leva a fenômenos de instabilidade, a falta de conhecimento em relação ao seu comportamento na

presença de fogo, que limita a sua utilização em edifícios, seu comportamento a fluência, podendo sofrer deformações significativas mesmo em temperatura ambiente, e a impossibilidade de realização de dobras no material em obra (Rosa, 2016). Ademais, em geral as barras de GFRP apresentam um módulo de elasticidade e aderência ao concreto inferior as barras de aço, apresentando comportamento frágil em oposição ao comportamento dúctil do aço (Instituto Brasileiro de Concreto, 2021).

2.5. MODELO DE CÁLCULO

O cálculo da capacidade de carga e dimensionamento da armadura das lajes com barras de aço foram realizados utilizando os procedimentos e considerações ditadas pela norma brasileira vigente NBR 6118 (2023) - Projeto de Estruturas de Concreto - e por Carvalho e Figueiredo (2014). Já para as lajes com barras de GFRP, devido à falta de normalização no país, foram realizados modelos de cálculos baseados no manual “Práticas Recomendadas para Projeto de Estruturas de Concreto Armado com Barras de FRP”, do IBRACON (2021) e no documento “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars” do ACI 440-1R (2015).

2.5.1. Princípios gerais e hipóteses básicas

Para o dimensionamento das lajes, inicialmente foram determinados os seguintes valores, que foram usados para as lajes armadas com barras de aço e para as lajes armadas com barras de GFRP.

- I. Combinações de ações para o estado-limite de serviço (ELS) e estado-limite último (ELU) de acordo com a NBR 8681 (2003), por meio das Equações de 1 a 4;

$$P_{ELS-CR} = \sum(g_1 + g_2) + q \quad (1)$$

$$P_{ELS-CF} = \Sigma(g_1 + g_2) + \Psi_1 \cdot q \quad (2)$$

$$P_{ELS-CQP} = \Sigma(g_1 + g_2) + \Psi_2 \cdot q \quad (3)$$

$$P_{ELU-NORMAL} = \Sigma\gamma_g \cdot (g_1 + g_2) + \gamma_q \cdot q \quad (4)$$

- II. Determinação das resistências de cálculo, por meio das Equações 5, 6 e 7;

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} \quad (6)$$

$$f_{fd} = C_E \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_m} \quad (7)$$

2.5.2. Lajes armadas com barras de aço

Para as lajes com barras de aço utilizou-se o seguinte roteiro de cálculo, que foi executado por meio de planilhas. Todos os cálculos e verificações dessa laje foram baseados na NBR 6118 (2023).

- I. Determinação da geometria das lajes;
- II. Determinação do comportamento da laje (λ);
- III. Determinação do momento fletor característico (l_x e l_y) para os estados-limites último e de serviço, por meio da Equação 8, na qual μ_x e μ_y são coeficientes de cálculo determinados por Carvalho e Figueiredo (2014).

$$M_{sk,x} = \mu_x \cdot \frac{P \cdot l_x^2}{100}; M_{sk,y} = \mu_y \cdot \frac{P \cdot l_x^2}{100} \quad (8)$$

- IV. Determinação do esforço cortante característico (ℓ_x e ℓ_y) para o estado-limite último, por meio da Equação 9, na qual k_x e k_y são coeficientes de cálculo determinados por Carvalho e Figueiredo (2014);

$$V_{sk,x} = k_x \cdot \frac{P \cdot \ell_x}{10}; V_{sk,y} = k_y \cdot \frac{P \cdot \ell_x}{10} \quad (9)$$

- V. Verificação a altura útil mínima (d_{\min}) considerando $x/d < 0,45$;
 VI. Dimensionamento da armadura positiva para as direções x e y, em que foram utilizados o método das equações adimensionais, conforme as Equações 10 e 11;

$$KMD_x = \frac{M_{sdx}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}}; KMD_y = \frac{M_{sdy}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (10)$$

$$AS_x = \frac{M_{sdx}}{KZ_x \cdot d \cdot f_{yd}}; AS_y = \frac{M_{sdy}}{KZ_y \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (11)$$

- VII. Verificação da armadura máxima e mínima, conforme a NBR 6118 (2023);
 VIII. Detalhamento das armaduras, com número de barras por metro, espaçamento e área efetiva;
 IX. Verificação quanto ao esforço cortante, por meio das Equações 12 e 13;

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d > V_{sd} \quad (12)$$

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d > V_{sd} \quad (13)$$

- X. Verificação do momento de fissuração, por meio da Equação 14;

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_0}{y_t} > M_{sk} \quad (14)$$

- XI. Verificação quanto à flecha imediata e infinita considerando que a laje está no Estádio I, através das Equações 15 e 16;

$$\delta_{ELS-CQP,ini} = \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{P_{ELS-CQP} \cdot \ell_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} \quad (15)$$

$$\delta_{ELS-CQP,\infty} = \delta_{ELS-CQP,ini} \cdot (1 + \alpha_f) < \delta_{lim} = \frac{\ell_x}{250} \quad (16)$$

- XII. Verificação quanto a abertura de fissuras, conforme Equação 17;

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \eta_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ct,m}} < w_{k,lim} = 0,4 \quad (17)$$

2.5.3. Lajes armadas com GFRP conforme IBRACON (2021)

Com base no IBRACON (2021), desenvolveu-se a seguinte sequência de cálculo para lajes armadas com barras de polímero reforçadas com fibras de vidro.

- I. Determinação da geometria da laje;
- II. Determinação da taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}) e da taxa de armadura (ρ_f), por meio das Equações 18 e 19;

$$\rho_{fb} = \lambda \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \cdot \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}} \quad (18)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w \cdot d} \quad (19)$$

- III. Determinação da armadura necessária e armadura mínima. Para isso, calculou-se o valor de armadura necessária para que o momento resistente fosse igual ao momento mínimo, conforme Equações 20 e 21;

$$M_{d,min} = 1,5 \cdot \frac{I_c}{y_t} \cdot f_{ctk,sup} \quad (20)$$

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} \cdot A_f \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \quad (21)$$

- IV. Detalhamento da armadura, com número de barras por metro, espaçamento e área efetiva;
- V. Verificação quanto à cortante, utilizando as Equações 22 e 23;

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1)] b_w d > V_{sd} \quad (22)$$

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d > V_{sd} \quad (23)$$

- VI. Verificação do momento de fissuração;
- VII. Verificação quanto à abertura de fissuras, por meio da Equação 24;

$$w_k = \frac{4}{E_f} \cdot \left[1,5 \cdot c_{nom} + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ct,m}}{\tau_b} \cdot \frac{\Phi}{\rho_{ef}} \right] \cdot \left[\sigma_{si-cf} - \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{ct,m}}{\rho_{ef}} \cdot \left(1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \cdot \rho_{ef} \right) \right] \quad (24)$$

VIII. Verificação quanto à flecha imediata e infinita, através das Equações 25 e 26;

$$\delta_{ELS-CQP,ini} = \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{P_{ELS-CQP} \cdot \ell_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} \quad (25)$$

$$\delta_{ELS-CQP,\infty} = \delta_{ELS-CQP,ini} \cdot (1 + \alpha_f) < \delta_{lim} = \frac{\ell_x}{250} \quad (26)$$

Caso a laje sofra fissuração, é utilizada a Equação 27 para o cálculo da flecha fissurada, que será utilizada para a determinação da flecha infinita.

$$\delta_{ELS-CQP,fiss} = \frac{I_0}{I_m} \cdot \delta_{ELS-CQP,ini} \quad (27)$$

2.5.4. Lajes armadas com GFRP conforme ACI 440-1R (2015)

Com base no ACI 440-1R (2015), foi desenvolvida a sequência de cálculo apresentada a seguir para lajes armadas com barras de polímero reforçadas com fibras de vidro.

- I. Determinação da geometria da laje;
- II. Determinação dos esforços característicos;
- III. Determinação da armadura necessário e armadura mínima por meio das Equações 28 e 29, considerando que $\rho_{fb}/\rho_f \approx 0,55$;

$$A_f = \frac{M_{sd}}{\phi \cdot f_{fd} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right)} \quad (28)$$

$$A_{f,min} = \rho_{f,ts} \cdot b \cdot h \quad (29)$$

- IV. Detalhamento da armadura, com número de barras por metro, espaçamento e área efetiva;
- V. Verificação quanto a ruptura, conforme Equação 30, considerando fissura limite de $w = 0,7$ mm;

$$d_c = \text{cobrimento} - \frac{\phi}{2} \leq d_{lim} = \frac{E_f \cdot w}{2 \cdot f_{fs} \cdot \beta \cdot k_b} \quad (30)$$

- VI. Verificação quanto ao espaçamento máximo, utilizando a Equação 31;

$$\text{menor} \left\{ \begin{array}{l} s_{m\acute{a}x} = 1,15 \cdot \frac{E_f \cdot w}{f_{fs} \cdot k_b} - 2,5 \cdot cob \\ s_{m\acute{a}x} = 0,92 \cdot \frac{E_f \cdot w}{f_{fs} \cdot k_b} \end{array} \right. \quad (31)$$

- VII. Verificação quanto a flecha máxima;
- VIII. Verificação quanto a cortante, através das Equações 32 e 33, no caso de lajes unidirecionais, e das Equações 34 e 35, para o caso de lajes bidirecionais;

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f_{cd}} \cdot bw \cdot k \cdot d \quad (32)$$

$$\frac{V_c}{2} > V_{sd} \quad (33)$$

$$V_c = \frac{4}{2} \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot bw \cdot k \cdot d \quad (34)$$

$$\frac{V_c}{2} > V_{sd} \quad (35)$$

2.5.5. Consumo de concreto e de armadura

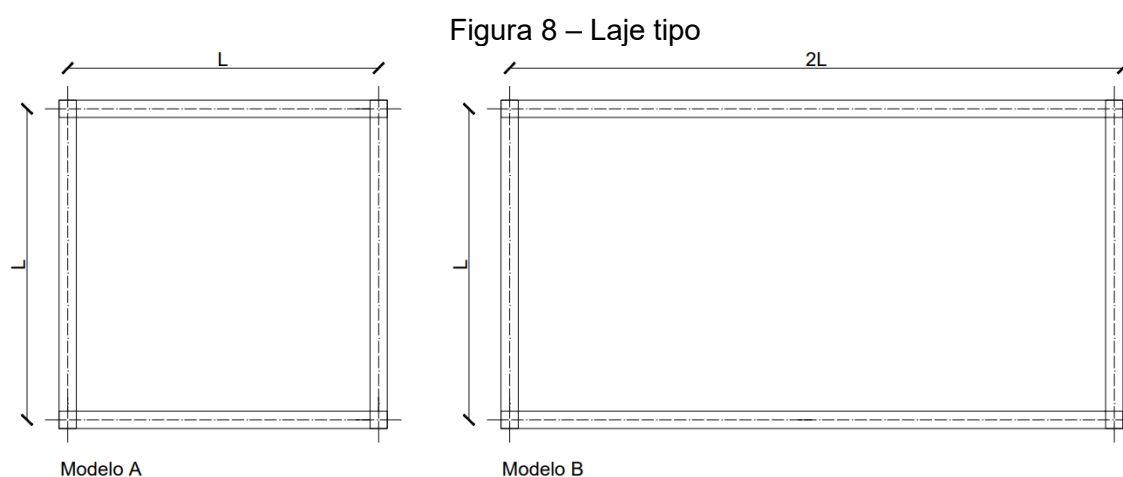
Após o dimensionamento e detalhamento das lajes e armaduras, foi realizado o cálculo do consumo de concreto, de aço e de GFRP para fins de comparação. Dessa forma, foram determinados para cada laje o volume de concreto usados e a quantidade de barras e o peso de aço e de GFRP necessárias.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentados os parâmetros e características físicas adotadas para as lajes tipo, assim como os carregamentos e considerações acerca do uso das mesmas, tanto para barras de aço, quanto para barras de GFRP.

3.1. PARÂMETROS DE PROJETO

Neste trabalho, foram utilizadas duas lajes tipo maciças com apoio simples e utilização residencial: uma quadrada, sendo o modelo A, e uma retangular, sendo o modelo B. Ambas as lajes estão representadas na Figura 8.



Fonte: Autora (2024).

Para o desenvolvimento dos cálculos e análises, foram propostos diferentes modelos de laje, com a variação de classe de agressividade ambiental (CAA), vão e f_{ck} . A CAA e o f_{ck} do concreto foram variados de acordo com a classificação e valores mínimos apresentados pela norma da ABNT NBR 6118 (2023), visando a análise da viabilidade da utilização de concreto reforçado com GFRP em ambientes mais agressivos. Quanto ao vão, seu valor foi variado de 3 a 6 metros. Com isso, foram criados um total de 32 modelos, apresentados na Tabela 3, na qual serão dimensionadas tanto armaduras de aço, quanto armaduras de GFRP.

Tabela 3 - Modelos analisados no trabalho

Modelo	ℓ_x (m)	ℓ_y (m)	CAA	Fck (MPa)
1-A	3	3	I	20
2-A	3	3	II	25
3-A	3	3	III	30
4-A	3	3	IV	40
5-A	4	4	I	20
6-A	4	4	II	25
7-A	4	4	III	30
8-A	4	4	IV	40
9-A	5	5	I	20
10-A	5	5	II	25
11-A	5	5	III	30
12-A	5	5	IV	40
13-A	6	6	I	20
14-A	6	6	II	25
15-A	6	6	III	30
16-A	6	6	IV	40
1-B	3	6	I	20
2-B	3	6	II	25
3-B	3	6	III	30
4-B	3	6	IV	40
5-B	4	8	I	20
6-B	4	8	II	25
7-B	4	8	III	30
8-B	4	8	IV	40
9-V	5	10	I	20
10-B	5	10	II	25
11-B	5	10	III	30
12-B	5	10	IV	40
13-B	6	12	I	20
14-B	6	12	II	25
15-B	6	12	III	30
16-B	6	12	IV	40

Fonte: Autora (2024).

O levamento das cargas permanentes presentes na laje foi realizado com base no peso aparente dos materiais de construção previstos na NBR 6120 (2019), na qual foram considerados os seguintes valores:

- Concreto armado: $\gamma_{ap-c} = 25 \text{ kN/m}^3$
- Revestimento: $\gamma_{ap-m} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Alvenaria (e=19 cm; cob = 1 cm): $\gamma_{alv} = 2,9 \text{ kN/m}^2$

Vale ressaltar que a espessura da laje de concreto armado varia com o vão livre e a espessura do cobrimento varia com a CAA, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de cobrimento nominais correspondentes as classes de agressividade ambiental

CAA	Cobrimento nominal (mm)
I	20
II	25
III	35
IV	45

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118 (2023).

Para as cargas acidentais (q) provenientes da utilização da estrutura, utilizou-se os valores característicos nominais das cargas variáveis de acordo com a NBR 6120 (2019), na qual foi considerado q para edifícios residenciais igual a $1,5 \text{ kN/m}^2$.

3.2. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAS

Para a realização da análise da utilização de armaduras de barras não metálicas e a sua comparação com barras metálicas, foram definidos valores de diâmetros e propriedades mecânicas para tais barras, de forma que essas possam ser encontradas no mercado. Assim, em relação a armadura metálica, foi adotado barras CA 50, com resistência a tração de 500 MPa, módulo de elasticidade de 200 GPa, peso específico de 7800 kg/m^3 e diâmetro de 12,5 mm para as lajes do modelo A e 16 mm para as lajes do modelo B, que são facilmente encontradas no mercado.

Quanto as barras de GFRP, foram adotados os valores apresentados Instituto Brasileiro de Concreto (2021), da qual também foram baseados os procedimentos de cálculo para o seu dimensionamento. Assim, utilizou-se barras de 12,5 mm para as lajes do modelo A e 16 mm para as lajes do modelo B, com resistência a tração de 800 MPa, peso específico de 2200 kg/m³ e módulo de elasticidade de 50 GPa.

4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos procedimentos de cálculo descritos acima para os modelos de lajes propostos. Com isso, pôde-se realizar uma comparação entre as lajes de concreto armadas com barras de aço e as lajes armadas com barras de GFRP e analisar a viabilidade da sua utilização.

4.1. ARMADURAS DIMENSIONADAS

Por meio dos procedimentos apresentados na Seção 2.5, calculou-se a armadura para os modelos de lajes propostos. Nas Tabelas 5 e 6, são apresentados os valores da geometria adotada, quantidade de barras por metro e área efetiva de barras de GFRP segundo o modelo do ACI 440-1R (2015).

Tabela 5 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo ACI 440-1R (2015)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)	barras/m efetiva (un)		Af,efetiva (cm ² /m)	
			Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
1-A	20	16	8	8	9,82	9,82
2-A	20	16	8	8	9,82	9,82
3-A	20	16	8	8	9,82	9,82
4-A	20	16	8	8	9,82	9,82
5-A	25	12	10	10	12,27	12,27
6-A	25	12	10	10	12,27	12,27
7-A	25	12	10	10	12,27	12,27
8-A	25	12	10	10	12,27	12,27
9-A	35	10	11	11	13,50	13,50
10-A	35	10	11	11	13,50	13,50
11-A	35	10	11	11	13,50	13,50
12-A	35	10	11	11	13,50	13,50
13-A	37	10	11	11	13,50	13,50
14-A	37	10	11	11	13,50	13,50
15-A	37	10	11	11	13,50	13,50
16-A	37	10	11	11	13,50	13,50

Fonte: Autora (2024).

Tabela 6 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo ACI 440-1R (2015)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)		barras/m (un)		Af (cm ² /m)	
		Direção x	Direção y	Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
1-B	24	20	20	6	6	12,06	12,06
2-B	24	20	20	6	6	12,06	12,06
3-B	24	20	20	6	6	12,06	12,06
4-B	23	18	20	7	6	14,07	12,06
5-B	34	18	18	7	7	14,07	14,07
6-B	31	18	20	7	6	14,07	12,06
7-B	31	16	20	8	6	16,08	12,06
8-B	31	15	20	8	6	16,08	12,06
9-B	47	10	14	11	9	22,12	18,10
10-B	43	15	16	8	8	16,08	16,08
11-B	40	13	16	9	8	18,10	16,08
12-B	39	12	19	10	7	20,11	14,07
13-B	62	10	10	11	11	22,12	22,12
14-B	56	10	11	11	11	22,12	22,12
15-B	53	11	12	11	10	22,12	20,11
16-B	49	10	14	11	9	22,12	18,10

Fonte: Autora (2024).

Mediante à análise dos valores obtidos, observa-se que as lajes apresentam uma altura elevada, principalmente no modelo B. Além disso, elas também apresentam uma quantidade alta de barras por metro, com os espaçamentos próximos ao valor mínimo de execução, o que também implica em uma área de barras elevada. No que diz respeito aos modelos dimensionado de acordo com o texto do IBRACON (2021), obteve-se os valores apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo IBRACON (2021)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)	barras/m (un)		Af (cm ² /m)	
			Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
1-A	10	20	6	6	7,36	7,36
2-A	10	20	6	6	7,36	7,36
3-A	10	18	7	7	8,59	8,59
4-A	11	15	8	8	9,82	9,82
5-A	11	14	9	9	11,04	11,04
6-A	11	12	10	10	12,27	12,27
7-A	12	12	10	10	12,27	12,27
8-A	13	12	10	10	12,27	12,27
9-A	15	12	10	10	12,27	12,27
10-A	15	12	10	10	12,27	12,27
11-A	15	10	11	11	13,50	13,50
12-A	16	10	11	11	13,50	13,50
13-A	21	10	11	11	13,50	13,50
14-A	20	10	11	11	13,50	13,50
15-A	21	10	11	11	13,50	13,50
16-A	21	10	11	11	13,50	13,50

Fonte: Autora (2024).

Tabela 8 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo IBRACON (2021)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)		barras/m (un)		Af (cm ² /m)	
		Direção	Direção	Direção	Direção	Direção	Direção
		x	y	x	y	x	y
1-B	12	18	20	7	6	14,07	12,06
2-B	12	16	20	8	6	16,08	12,06
3-B	15	18	20	7	6	14,07	12,06
4-B	15	18	20	7	6	14,07	12,06
5-B	16	12	20	10	6	20,11	12,06
6-B	15	12	20	10	6	20,11	12,06
7-B	17	11	20	11	6	22,12	12,06
8-B	17	10	20	11	6	22,12	12,06
9-B	23	10	20	11	6	22,12	12,06
10-B	24	10	20	11	6	22,12	12,06
11-B	25	10	20	11	6	22,12	12,06
12-B	25	10	20	11	6	22,12	12,06
13-B	44	10	20	11	6	22,12	12,06
14-B	38	10	20	11	6	22,12	12,06
15-B	37	10	20	11	6	22,12	12,06
16-B	34	10	20	11	6	22,12	12,06

Fonte: Autora (2024).

Em uma comparação entre os dois modelos de cálculo apresentados, percebe-se que o procedimento do IBRACON (2021) resulta em alturas menores, sendo que nas lajes do tipo A essa altura representa praticamente metade do valor dimensionado pelo procedimento do ACI (2015). Em relação a quantidade de barras, no entanto, os dois procedimentos apresentam valores muito semelhantes, ambos com espaçamentos próximos ao mínimo de execução. Por sua vez, os valores de geometria adotada, espaçamento e quantidade de barras para as lajes armadas com aço dimensionadas de acordo com a NBR 6118 (2023) são exibidos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Dimensionamento das lajes do modelo A segundo NBR 6118 (2023)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)	barras/m (un)		Af (cm ² /m)	
			Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
1-A	9	20	6	6	7,36	7,36
2-A	8	20	6	6	7,36	7,36
3-A	9	20	6	6	7,36	7,36
4-A	10	20	6	6	7,36	7,36
5-A	12	20	6	6	7,36	7,36
6-A	11	20	6	6	7,36	7,36
7-A	11	20	6	6	7,36	7,36
8-A	11	17	7	7	8,59	8,59
9-A	15	25	5	5	6,14	6,14
10-A	15	25	5	5	6,14	6,14
11-A	14	20	6	6	7,36	7,36
12-A	13	17	7	7	8,59	8,59
13-A	19	20	6	6	7,36	7,36
14-A	18	20	6	6	7,36	7,36
15-A	17	17	7	7	8,59	8,59
16-A	16	15	8	8	9,82	9,82

Fonte: Autora (2024).

Tabela 10 – Dimensionamento das lajes do modelo B segundo NBR 6118 (2023)

Modelo	h adotado (cm)	s adotado (cm)		barras/m (un)		Af (cm ² /m)	
		Direção	Direção	Direção	Direção	Direção	Direção
		x	y	x	y	x	y
1-B	12	20	20	6	6	12,06	12,06
2-B	12	20	20	6	6	12,06	12,06
3-B	12	20	20	6	6	12,06	12,06
4-B	12	20	20	6	6	12,06	12,06
5-B	16	20	20	6	6	12,06	12,06
6-B	14	20	20	6	6	12,06	12,06
7-B	14	20	20	6	6	12,06	12,06
8-B	14	17	20	7	6	14,07	12,06
9-B	21	20	20	6	6	12,06	12,06
10-B	19	20	20	6	6	12,06	12,06
11-B	18	17	20	7	6	14,07	12,06
12-B	16	15	20	8	6	16,08	12,06
13-B	27	20	20	6	6	12,06	12,06
14-B	25	17	20	7	6	14,07	12,06
15-B	23	17	20	7	6	14,07	12,06
16-B	20	13	20	9	6	18,10	12,06

Fonte: Autora (2024).

Ao analisar os resultados, nota-se que as lajes armadas com aço apresentam, em geral, as menores alturas. No modelo B, essa diferença é maior, principalmente em relação aos modelos dimensionados pelo procedimento do ACI (2014). Já para o modelo A, essa diferença é menor, apresentando valores próximos aos dimensionados pelo procedimento do IBRACON (2021). Elas também possuem um espaçamento maior entre barras, o que diminui a sua quantidade total.

Quanto a área de armadura, a menor quantidade de barras pode ser atribuída, em parte, ao valor de módulo de elasticidade das barras de GFRP ser consideravelmente inferior ao valor do aço. Isso torna a laje mais propícia a fissuração e ruptura, que foram dois fatores limitantes no cálculo da quantidade de barras para os modelos armados com GFRP.

Além disso, apesar das barras de fibra de vidro possuírem uma resistência à tração de 1,6 vezes a resistência à tração do aço, esse valor é minorado por um fator de 1,625, enquanto o aço é minorado por 1,15, o que diminui a sua vantagem quanto à resistência. Ademais, o manual do ACI apresenta considerações mais conservadoras, tanto em relação ao cálculo inicial da altura das lajes, quanto em relação a armadura mínima requerida, o que pode influenciar em um aumento nesses dois valores para as lajes calculadas por esse procedimento.

4.2. COMPARATIVO ENTRE AS LAJES

A partir dos resultados obtidos pelo dimensionamento das lajes para os três modelos de cálculos propostos, pôde-se desenvolver um comparativo de quantidade de armadura e concreto necessários para os diferentes modelos de lajes. Dessa forma, é apresentado nas Tabelas 11 e 12 os valores de número de barras total nas lajes, peso de armadura e volume de concreto.

Tabela 11 – Tabela comparativo do modelo A

Modelo	Número de barras (un)			Peso da armadura (kg)			Volume de concreto (m ³)		
	ACI	IBRACON	AÇO	ACI	IBRACON	AÇO	ACI	IBRACON	AÇO
1-A	48	36	36	38,88	29,16	103,38	1,80	0,90	0,81
2-A	48	36	30	38,88	29,16	86,15	1,80	0,90	0,72
3-A	48	42	30	38,88	34,02	86,15	1,80	0,90	0,81
4-A	48	48	30	38,88	38,88	86,15	1,80	0,99	0,90
5-A	80	72	32	86,39	77,75	122,52	4,00	1,76	1,92
6-A	80	80	40	86,39	86,39	153,15	4,00	1,76	1,76
7-A	80	80	48	86,39	86,39	183,78	4,00	1,92	1,76
8-A	80	80	56	86,39	86,39	214,41	4,00	2,08	1,76
9-A	110	100	50	148,49	134,99	239,30	8,75	3,75	3,75
10-A	110	100	50	148,49	134,99	239,30	8,75	3,75	3,75
11-A	110	110	60	148,49	148,49	287,16	8,75	3,75	3,50
12-A	110	110	70	148,49	148,49	335,02	8,75	4,00	3,25
13-A	132	132	72	213,82	213,82	413,51	13,32	7,56	6,84
14-A	132	132	72	213,82	213,82	413,51	13,32	7,20	6,48
15-A	132	132	84	213,82	213,82	482,43	13,32	7,56	6,12
16-A	132	132	96	213,82	213,82	551,35	13,32	7,56	5,76

Fonte: Autora (2024).

Tabela 12 – Tabela comparativa do modelo B

Modelo	Número de barras			Peso da armadura (kg)			Volume de concreto (m ³)		
	ACI	IBRACON	AÇO	ACI	IBRACON	AÇO	ACI	IBRACON	AÇO
1-B	54	60	54	95,54	103,51	338,75	4,32	2,16	2,16
2-B	54	66	54	95,54	111,47	338,75	4,32	2,16	2,16
3-B	54	60	54	95,54	103,51	338,75	4,32	2,70	2,16
4-B	60	60	54	103,51	103,51	338,75	4,14	2,70	2,16
5-B	84	104	72	198,17	226,48	602,22	10,88	5,12	5,12
6-B	80	104	72	184,01	226,48	602,22	9,92	4,80	4,48
7-B	88	112	72	198,17	240,63	602,22	9,92	5,44	4,48
8-B	88	112	80	198,17	240,63	652,41	9,92	5,44	4,48
9-B	155	140	90	442,34	375,99	940,97	23,50	11,50	10,50
10-B	120	140	90	353,87	375,99	940,97	21,50	12,00	9,50
11-B	130	140	100	375,99	375,99	1019,38	20,00	12,50	9,00
12-B	135	140	110	375,99	375,99	1097,80	19,50	12,50	8,00
13-B	198	168	108	700,66	541,42	1355,00	44,64	31,68	19,44
14-B	198	168	120	700,66	541,42	1467,91	40,32	27,36	18,00
15-B	192	168	120	668,81	541,42	1467,91	38,16	26,64	16,56
16-B	186	168	144	636,96	541,42	1693,75	35,28	24,48	14,40

Fonte: Autora (2024).

A fim de facilitar a visualização dos resultados, com os valores das Tabelas 11 e 12 foram realizados gráficos com o peso de armadura de acordo com a variação dos vãos da laje para cada classe de agressividade ambiental, conforme apresentados nos Gráficos de 1 a 4.

Gráfico 1 – Peso da armadura para a classe de agressividade I

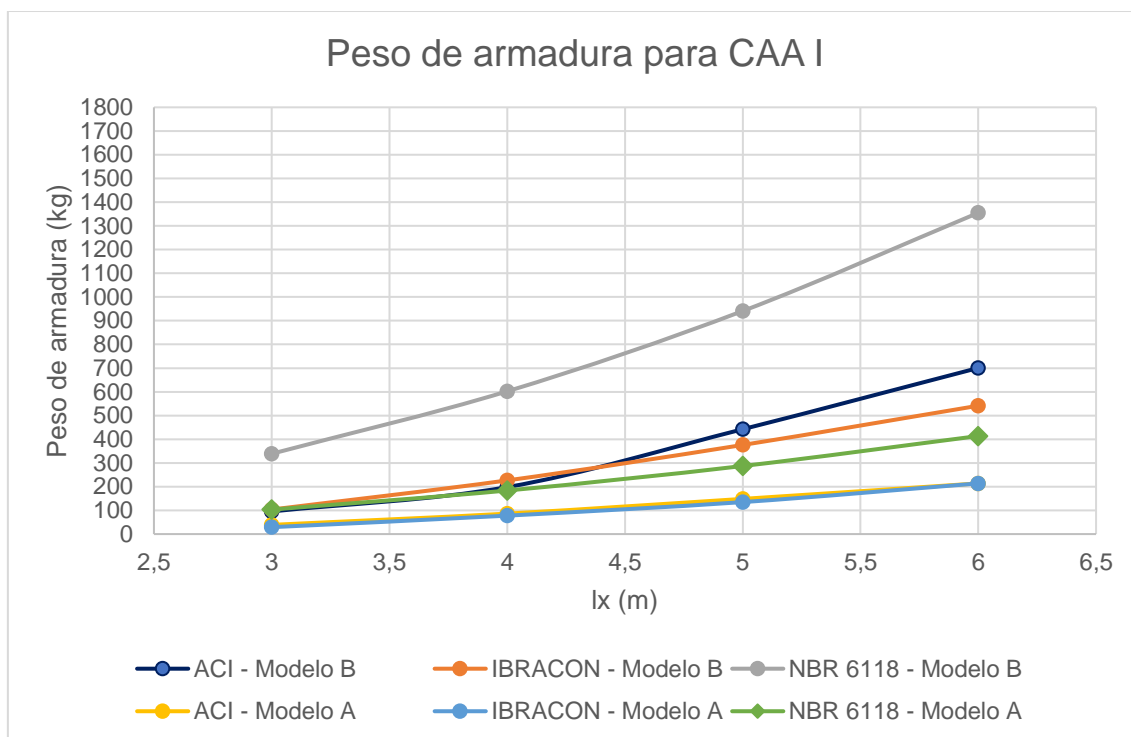


Gráfico 2 – Peso da armadura para a classe de agressividade II

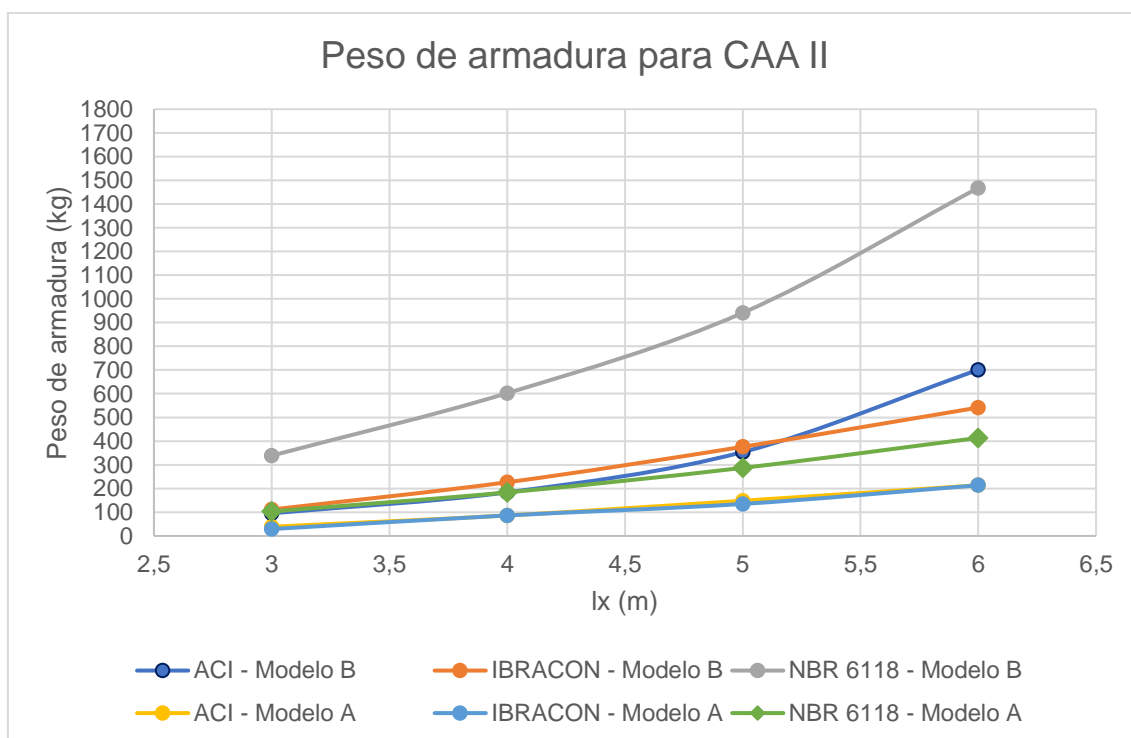


Gráfico 3 – Peso da armadura para a classe de agressividade III

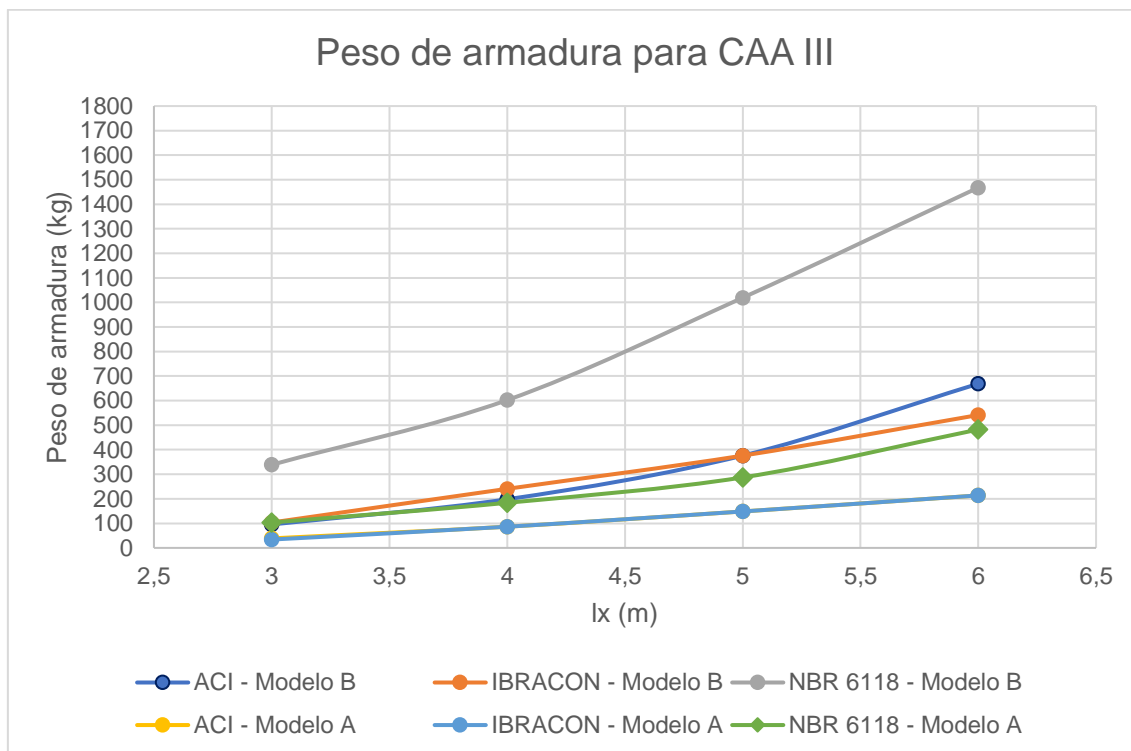
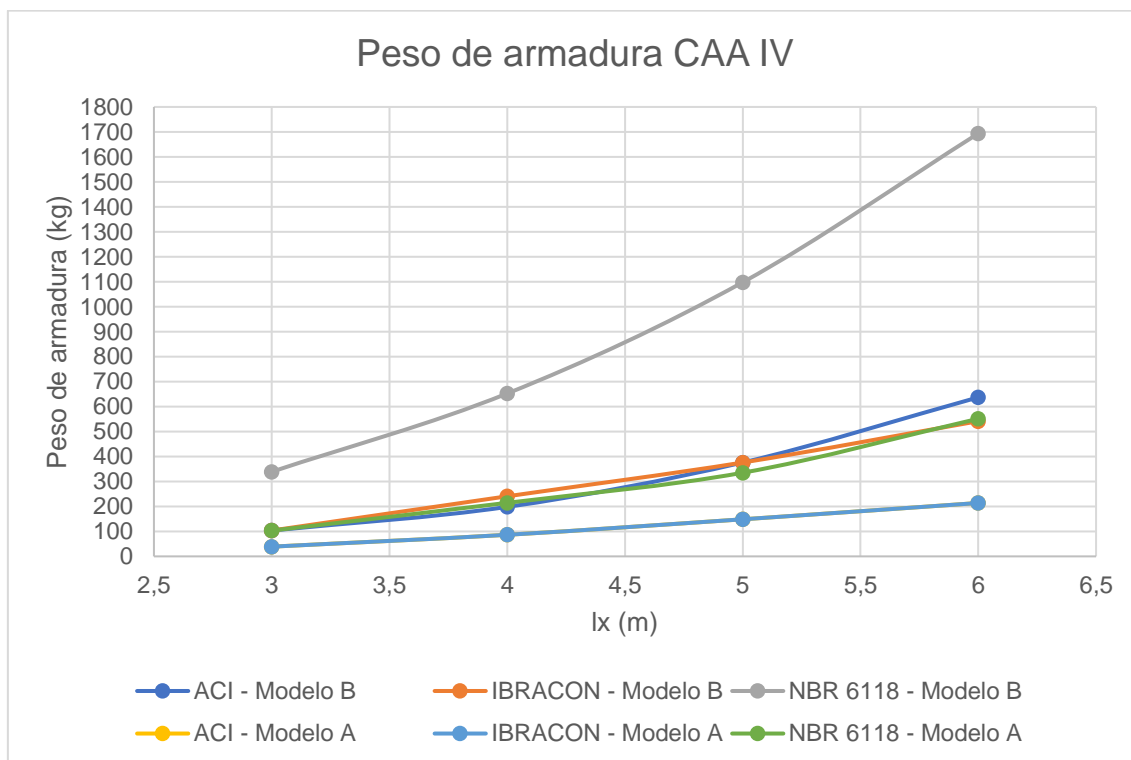


Gráfico 4 – Peso da armadura para a classe de agressividade IV



Foram desenvolvidos também gráficos com a variação do volume de concreto para os diferentes vãos e diferentes classes de agressividade ambiental, conforme os Gráficos de 5 a 8.

Gráfico 5 – Volume de concreto a classe de agressividade I

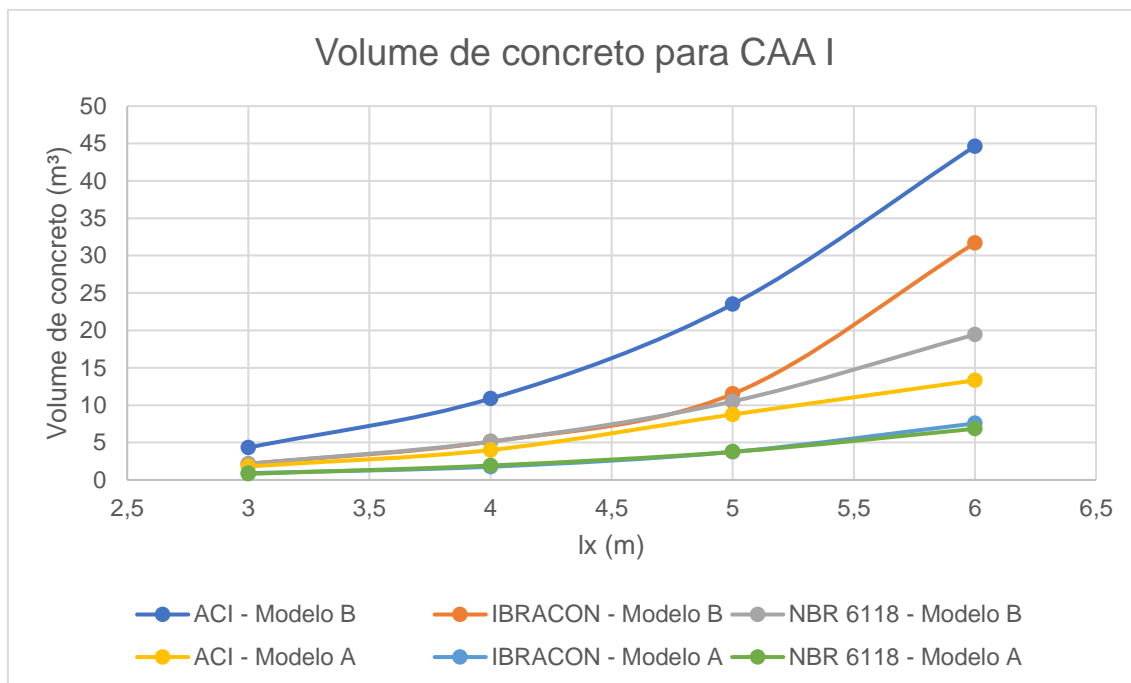


Gráfico 6 – Volume de concreto para a classe de agressividade II

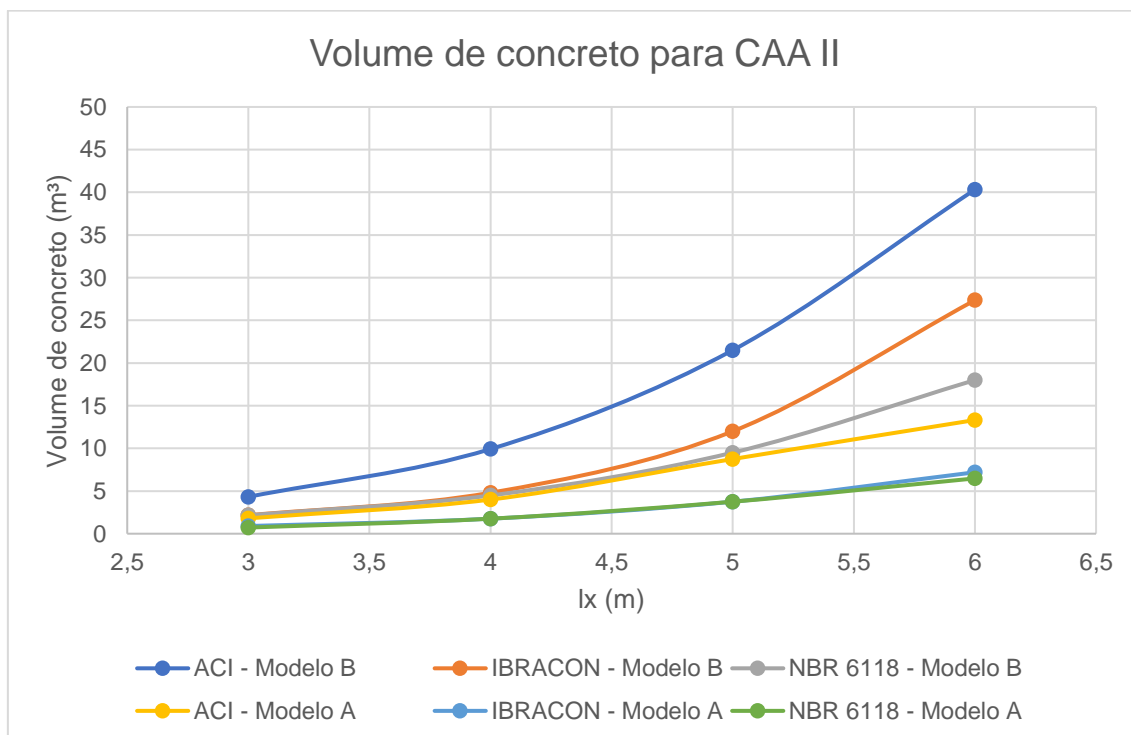


Gráfico 7 – Volume de concreto para a classe de agressividade III

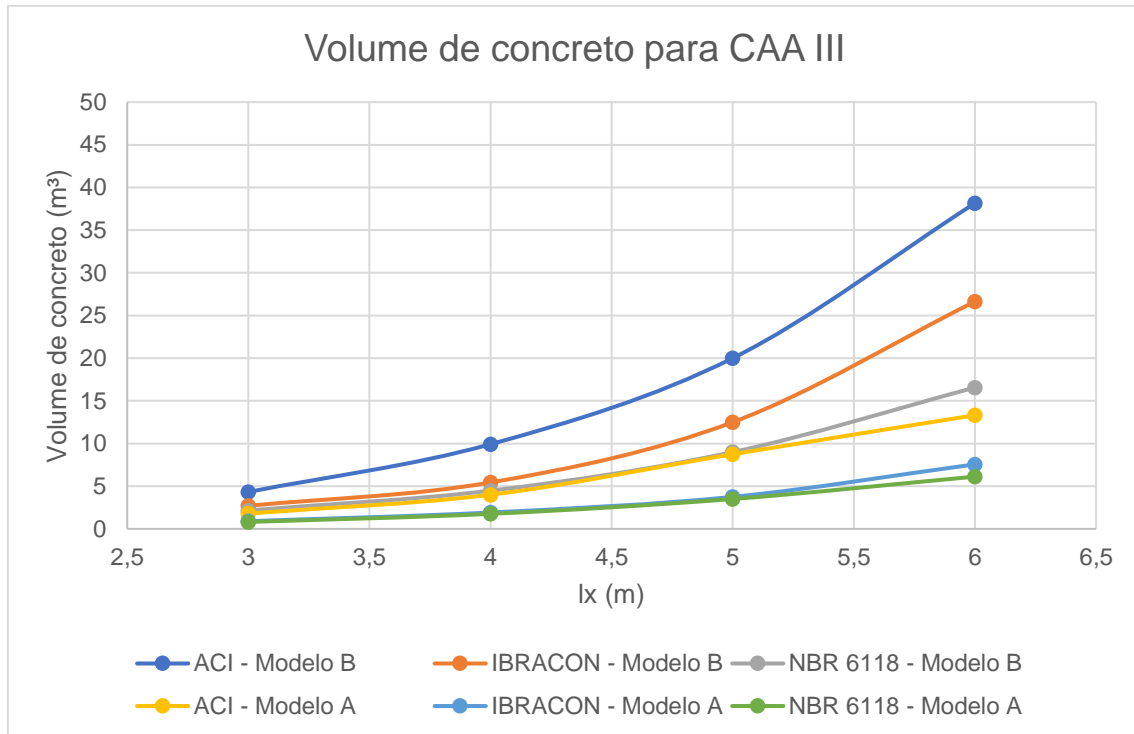
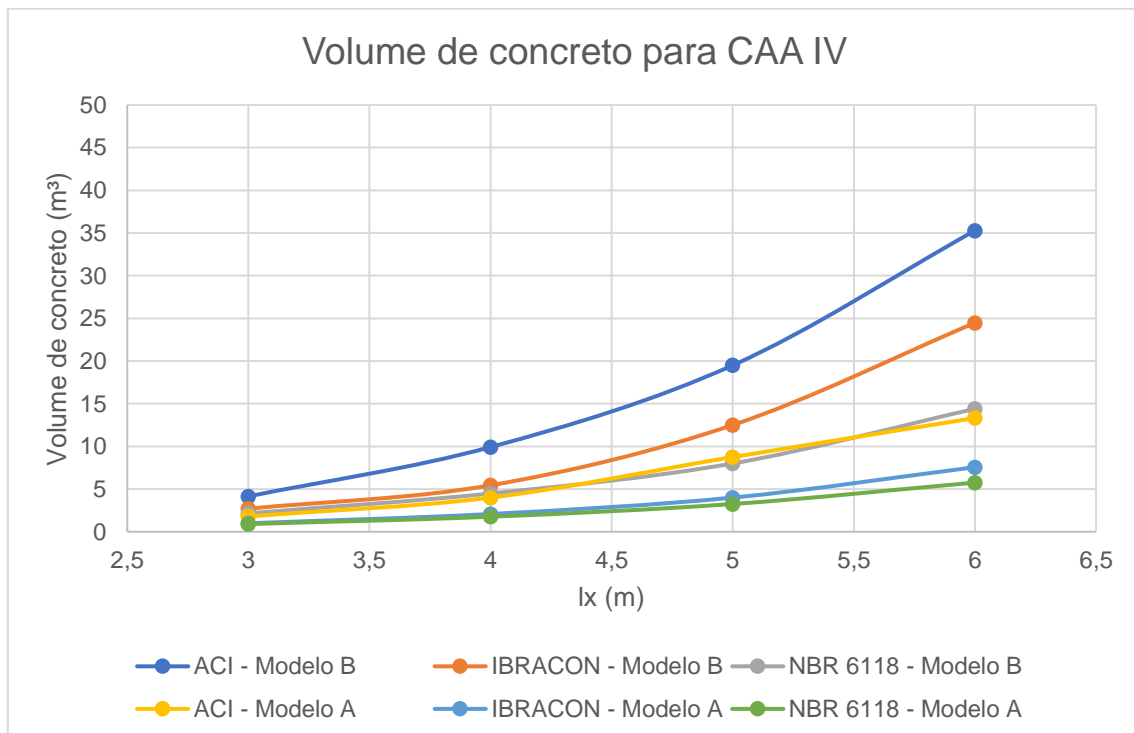


Gráfico 8 – Volume de concreto para a classe de agressividade IV



Por meio da comparação dos quantitativos, nota-se que, apesar da quantidade de barras de aço ser inferior as de GFRP, em todos os casos, para

um mesmo vão livre, as lajes armadas com aço possuem um peso maior de armadura. Isso ocorre pelo fato da densidade das barras de fibra de vidro ser de aproximadamente 30% da densidade do aço. Dessa forma, a utilização de armaduras compostas por fibras de vidro pode ser uma alternativa para a redução do peso de armadura.

No entanto, as lajes dimensionadas pelo procedimento do ACI (2015) e do IBRACON (2021) em geral apresentam alturas maiores do que as lajes armadas com aço desenvolvidas pelo procedimento da NBR 6118 (2023) e, conseqüentemente, também apresentam um consumo de concreto maior. Assim, na maioria dos casos, mesmo com a diminuição no peso de armadura, as lajes com barras de fibra de vidro possuem peso total superior as lajes com aço, considerando que o peso do concreto armado é de 2500 kg/m^3 . Porém, como a densidade das barras de GFRP é menor que a densidade do aço, o peso do concreto armado com fibras de vidro também seria menor.

O manual do ACI (2015) traz ainda a possibilidade da redução do cobrimento das lajes armadas com GFRP, devido sua a maior resistência à ambientes agressivos. Em vista disso, o peso da estrutura seria reduzido e a área útil aumentada. É importante ressaltar ainda que a diferença de altura entre as lajes armadas com aço e com fibras de vidro é maior na medida que o vão livre aumenta. No entanto, para essas lajes, uma outra solução seria a utilização de lajes nervuradas, o que não foi explorado neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

O estudo de novos materiais e técnicas na construção civil é extremamente importante para garantir o melhoramento constante do setor, com soluções mais eficientes e econômicas. Com isso, o desenvolvimento de pesquisas em relação às armaduras não metálicas é fundamental para que mudanças positivas sejam incentivadas na engenharia civil.

A partir da realização do trabalho, tornou-se evidente que a utilização de GFRP como armaduras de lajes traz benefícios, como a redução do peso de armadura, devido ao menor peso próprio do material, o que leva a menores cargas na estrutura. Além disso, esse menor peso próprio implica ainda em vantagens executivas que não foram aprofundadas na presente pesquisa, como maior facilidade de transporte e manuseio das barras em canteiros de obra, facilitando também o processo construtivo.

Contudo, a grande vantagem das barras GFRP é a sua resistência à corrosão superior à do aço, o que a torna uma excelente opção para ambientes de alta agressividade, como áreas industriais e ambientes marinhos, além de aumentar a sua vida útil e diminuir os gastos com a sua manutenção ao longo dos anos. Esse fator abre também a possibilidade de estudos acerca dos diversos parâmetros envolvidos no dimensionamento de lajes, como a viabilidade da redução do f_{ck} mínimo, devido a maior resistência a corrosão, ou do cobrimento mínimo, aumentando assim a altura útil das lajes.

Com base nos resultados obtidos, nota-se que em geral as lajes armadas com barras de aço possuem espessuras menores do que as lajes armadas com fibras de vidro. No entanto, essa diferença mostra-se pequena para os casos de lajes com vãos livres menores, principalmente se comparado com os valores obtidos com o procedimento do IBRACON (2021). Dessa forma, tem-se que a realização de armaduras de GFRP é viável. Além disso, pode-se também ter como solução a aplicação da armadura de GFRP em conjunto à armadura de aço, buscando-se otimizar a utilização dos recursos existentes na construção civil.

Outro ponto evidenciado pelo estudo realizado foi a necessidade de desenvolvimento de normas brasileiras em relação às armaduras de GFRP. Isso é afirmado pela falta de informação a respeito do seu dimensionamento na

literatura nacional. Ademais, já são encontradas normas sobre esse assunto em outros países, como o Canadá, Japão e os Estados Unidos, acentuando a defasagem do país quanto às armaduras não metálicas. Dessa forma, a realização de armaduras de GFRP para fins estruturais mostra-se uma alternativa promissora. No entanto, é necessário ainda o estudo a respeito das suas características e do seu dimensionamento, para garantir a segurança das estruturas.

5.1. PROPOSTAS DE PESQUISAS FUTURAS

A partir do trabalho realizada, propõe-se a realização das seguintes pesquisas futuras:

- Projeto de lajes nervuradas de concreto armadas com barras não metálicas;
- Estudo da variação do cobrimento e fck em lajes armadas com barras não metálicas;
- Orçamentação de lajes armadas com GFRP;

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440-1R-15**: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, Farmington Hills, USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D7957**: Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement. West Conshohocken, USA, 2022. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/111857/0449753f3b89402b9b749dca75a606c4/ASTM-D7957-D7957M-22.pdf> . Acesso em: 19 jan. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto. 4 ed. Rio de Janeiro: [S.N], 2023. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o Cálculo de Estruturas de Edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: [S.N], 2019. 61 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: [S.N], 2003. 15 p.

AYDIN, Ferhat. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 163, p. 1-8, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.101>. Acesso em: 01 jan. 2024.

BASTOS, Paulo Sérgio. Lajes de Concreto Armada: curso 2117 – Estruturas de Concreto I, out. de 2023. 114 f. Notas de Aula. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CORREIA, Manuel Mendes. **Comportamento estrutural de perfis pultrudidos de GFRP**: caracterização experimental e modelação numérica. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

CUSTODIO, Kátia Regina. **Estruturas de Concreto Armado I**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018. 248 p. Disponível em: https://cm-kl-content.s3.amazonaws.com/201802/INTERATIVAS_2_0/ESTRUTURAS_DE_CONCRETO_ARMADO_I/U1/LIVRO_UNICO.pdf. Acesso em: 06 mar. 2024.

INEIA, Adriano *et al.* Barras de fibra de vidro, uma alternativa inovadora e suas potencialidades: revisão bibliográfica. **Tecno-Lógica**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 243-251, 5 jul. 2021. APESC - Associação Pro-Ensino em Santa Cruz do Sul. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v25i2.16214>. Acesso em: 29 nov. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Práticas Recomendadas para Projeto de Estruturas de Concreto Armado com Barras de FRP**. São Paulo, 2021. 51 p.

MOURA, Ruan Carlos de Araújo. **Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidas ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas**. 2021. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de

Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/34934>. Acesso em: 10 dez. 2023.

PAIVA, Matheus Barbosa Maltez de *et al.* BARRA DE FIBRA DE VIDRO COMO ALTERNATIVA A BARRA DE AÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 9, n. 7, p. 1418–1434, 2023. DOI: 10.51891/rease.v9i7.10737. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/10737>. Acesso em: 23 dez. 2023.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS**. São Carlos: Eesc, 2007. Disponível em: <https://arquitetonica.files.wordpress.com/2011/11/fundamentos-do-concreto-eesc-usp.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2024.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 nov. 2023.

RAY, Bankim Chandra; RATHORE, Dinesh. Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: critical concepts and comments. **Advances In Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 209, p. 68-83, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.014>. Disponível em: <https://encr.pw/SxR2b>. Acesso em: 23 dez. 2023.

ROSA, Inês Cruz Mina. **Comportamento mecânico de materiais compósitos FRP a temperatura elevada**. 2016. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4711>. Acesso em: 01 jan. 2024.

ANEXO A – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DA NBR 6118
(2023)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
fy	50	kN/cm ²	γc	25	kN/m ³	γg	1,4	-
γm	1,15	-	γrev	20	kN/m ³	γq	1,4	-
fyd	43,48	kN/cm ²	γalv	2,9	kN/m ²			
Ef	200	GPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
φ	12,5	mm	Ψ1	0,4	-	μx/kx	4,41	2,5
			Ψ2	0,3	-	μy/ky	4,41	2,5

Valores adotados			
εfu	0,016	αc	0,85
εcu	0,003	λ	0,8
φ	0,55	γc	1,4
Es (GPa)	200	α	1,5
w (mm)	0,7	α	11,68
kb	1,4		

Pré-dimensionamento da geometria								
Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-A	20	20	14,29	3	3	8	9	5,13
2-A	25	25	17,86	3	3	8	8	3,63
3-A	35	30	21,43	3	3	8	9	3,63
4-A	45	40	28,57	3	3	8	10	3,63
5-A	20	20	14,29	4	4	10	12	8,13
6-A	25	25	17,86	4	4	10	11	6,63
7-A	35	30	21,43	4	4	10	11	5,63
8-A	45	40	28,57	4	4	10	11	4,63
9-A	20	20	14,29	5	5	13	15	11,13
10-A	25	25	17,86	5	5	13	15	10,63
11-A	35	30	21,43	5	5	13	14	8,63
12-A	45	40	28,57	5	5	13	13	6,63
13-A	20	20	14,29	6	6	15	19	15,13
14-A	25	25	17,86	6	6	15	18	13,63
15-A	35	30	21,43	6	6	15	17	11,63
16-A	45	40	28,57	6	6	15	16	9,63

Combinações de ELS e ELU							
Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-A	2,25	3,9	1,5	7,65	6,75	6,6	10,71
2-A	2	3,9	1,5	7,4	6,5	6,35	10,36
3-A	2,25	3,9	1,5	7,65	6,75	6,6	10,71

4-A	2,5	3,9	1,5	7,9	7	6,85	11,06
5-A	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
6-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
7-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
8-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
9-A	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
10-A	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
11-A	3,5	3,9	1,5	8,9	8	7,85	12,46
12-A	3,25	3,9	1,5	8,65	7,75	7,6	12,11
13-A	4,75	3,9	1,5	10,15	9,25	9,1	14,21
14-A	4,5	3,9	1,5	9,9	9	8,85	13,86
15-A	4,25	3,9	1,5	9,65	8,75	8,6	13,51
16-A	4	3,9	1,5	9,4	8,5	8,35	13,16

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELS-cf		ELS-cr	
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)
1-A	2,62	2,62	2,68	2,68	3,04	3,04
2-A	2,52	2,52	2,58	2,58	2,94	2,94
3-A	2,62	2,62	2,68	2,68	3,04	3,04
4-A	2,72	2,72	2,78	2,78	3,14	3,14
5-A	5,19	5,19	5,29	5,29	5,93	5,93
6-A	5,01	5,01	5,12	5,12	5,75	5,75
7-A	5,01	5,01	5,12	5,12	5,75	5,75
8-A	5,01	5,01	5,12	5,12	5,75	5,75
9-A	8,93	8,93	9,10	9,10	10,09	10,09
10-A	8,93	8,93	9,10	9,10	10,09	10,09
11-A	8,65	8,65	8,82	8,82	9,81	9,81
12-A	8,38	8,38	8,54	8,54	9,54	9,54
13-A	14,45	14,45	14,69	14,69	16,11	16,11
14-A	14,05	14,05	14,29	14,29	15,72	15,72
15-A	13,65	13,65	13,89	13,89	15,32	15,32
16-A	13,26	13,26	13,49	13,49	14,92	14,92

Esforços característicos				
Modelo	ELU			
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Vsk,x (kN)	Vsk,y (kN)
1-A	4,25	4,25	8,03	8,03
2-A	4,11	4,11	7,77	7,77
3-A	4,25	4,25	8,03	8,03
4-A	4,39	4,39	8,30	8,30
5-A	8,30	8,30	11,76	11,76
6-A	8,05	8,05	11,41	11,41
7-A	8,05	8,05	11,41	11,41
8-A	8,05	8,05	11,41	11,41

9-A	14,12	14,12	16,01	16,01
10-A	14,12	14,12	16,01	16,01
11-A	13,74	13,74	15,58	15,58
12-A	13,35	13,35	15,14	15,14
13-A	22,56	22,56	21,32	21,32
14-A	22,00	22,00	20,79	20,79
15-A	21,45	21,45	20,27	20,27
16-A	20,89	20,89	19,74	19,74

Dimensionamento da armadura mínima e máxima					
Modelo	Md,min (kNm/m)	KMDmin	Kzmin	As,min (cm ² /m)	As max (cm ² /m)
1-A	3,10	0,08	0,95	1,47	36,00
2-A	2,85	0,12	0,92	1,96	32,00
3-A	4,07	0,14	0,91	2,85	36,00
4-A	6,08	0,16	0,89	4,33	40,00
5-A	5,52	0,06	0,96	1,80	48,00
6-A	5,38	0,07	0,96	1,95	44,00
7-A	6,07	0,09	0,94	2,63	44,00
8-A	7,36	0,12	0,92	3,96	44,00
9-A	8,62	0,05	0,97	2,25	60,00
10-A	10,00	0,05	0,97	2,25	60,00
11-A	9,84	0,06	0,96	2,73	56,00
12-A	10,28	0,08	0,95	3,77	52,00
13-A	13,83	0,04	0,97	2,85	76,00
14-A	14,40	0,04	0,97	2,70	72,00
15-A	14,51	0,05	0,97	2,96	68,00
16-A	15,57	0,06	0,96	3,86	64,00

Dimensionamento da armadura necessária para a direção x e y								
Modelo	KMD	KZ	As (cm ²)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-A	0,1586	0,8299	3,22	3	34	20	6	7,36
2-A	0,2453	0,8254	4,43	4	25	20	6	7,36
3-A	0,2113	0,8515	4,43	4	25	20	6	7,36
4-A	0,1637	0,8911	4,38	4	25	20	6	7,36
5-A	0,1232	0,9201	3,57	3	34	20	6	7,36
6-A	0,1438	0,9058	4,32	4	25	20	6	7,36
7-A	0,1662	0,8873	5,19	5	20	20	6	7,36
8-A	0,1844	0,8757	6,40	6	17	17	7	8,59
9-A	0,1118	0,9270	4,41	4	25	25	5	6,14
10-A	0,0981	0,9372	4,57	4	25	25	5	6,14
11-A	0,1206	0,9236	5,55	5	20	20	6	7,36
12-A	0,1491	0,9022	7,19	6	17	17	7	8,59
13-A	0,0966	0,9372	5,12	5	20	20	6	7,36
14-A	0,0929	0,9406	5,53	5	20	20	6	7,36
15-A	0,1037	0,9130	6,51	6	17	17	7	8,59
16-A	0,1105	0,9305	7,51	7	15	15	8	9,82

Verificação quanto à abertura de fissura				Verificação da cortante				
Modelo	wk (mm)	wk lim (mm)	wk < wk lim	Modelo	Vrd2 (kN/m)	Vsd < Vrd2	Vrd1 (kN/m)	Vsd < Vrd1
1-A	0,23	0,40	OK!	1-A	164,73	OK!	38,92	OK!
2-A	0,19	0,40	OK!	2-A	145,65	OK!	36,35	OK!
3-A	0,17	0,40	OK!	3-A	174,78	OK!	41,05	OK!
4-A	0,14	0,40	OK!	4-A	233,04	OK!	49,73	OK!
5-A	0,23	0,40	OK!	5-A	261,16	OK!	53,27	OK!
6-A	0,20	0,40	OK!	6-A	266,18	OK!	53,58	OK!
7-A	0,18	0,40	OK!	7-A	271,21	OK!	54,19	OK!
8-A	0,15	0,40	OK!	8-A	297,32	OK!	61,24	OK!
9-A	0,24	0,40	OK!	9-A	357,59	OK!	65,01	OK!
10-A	0,20	0,40	OK!	10-A	426,90	OK!	72,82	OK!
11-A	0,18	0,40	OK!	11-A	415,85	OK!	72,87	OK!
12-A	0,15	0,40	OK!	12-A	425,89	OK!	76,60	OK!
13-A	0,24	0,40	OK!	13-A	486,16	OK!	84,44	OK!
14-A	0,21	0,40	OK!	14-A	547,43	OK!	90,55	OK!
15-A	0,18	0,40	OK!	15-A	560,49	OK!	93,40	OK!
16-A	0,15	0,40	OK!	16-A	618,75	OK!	102,08	OK!

Verificação quanto à flecha						
Modelo	Mr (kNm/m)	Msk,cqp < Mr	$\delta_{cpq-ini}$ (mm)	δ_{∞} (mm)	δ_{lim} (mm)	$\delta < \delta_{lim}$
1-A	4,48	OK!	4,02	9,35	12	OK!
2-A	4,10	OK!	4,86	11,29	12	OK!
3-A	5,87	OK!	3,19	7,41	12	OK!
4-A	8,77	OK!	2,03	4,72	12	OK!
5-A	7,96	OK!	5,97	13,88	16	OK!
6-A	7,76	OK!	6,60	15,34	16	OK!
7-A	8,76	OK!	5,94	13,80	16	OK!
8-A	10,61	OK!	5,00	11,62	16	OK!
9-A	12,43	OK!	8,23	19,12	20	OK!
10-A	14,43	OK!	7,25	16,85	20	OK!
11-A	14,19	OK!	7,78	18,07	20	OK!
12-A	14,82	OK!	7,92	18,40	20	OK!
13-A	19,95	OK!	9,43	21,91	24	OK!
14-A	20,78	OK!	9,51	22,09	24	OK!
15-A	20,93	OK!	9,87	22,93	24	OK!
16-A	22,46	OK!	9,68	22,49	24	OK!

ANEXO B – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DA NBR 6118
(2023)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
fy	50	kN/cm ²	γc	25	kN/m ³	γg	1,4	-
γm	1,15	-	γrev	20	kN/m ³	γq	1,4	-
fyd	43,48	kN/cm ²	γalv	2,9	kN/m ²			
Ef	200	GPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
φ	16	mm	Ψ1	0,4	-	μx/kx	10	3,75
			Ψ2	0,3	-	μy/ky	3,64	2,5

Valores adotados			
εfu	0,016	αc	0,85
εcu	0,003	λ	0,8
φ	0,55	γc	1,4
Es (GPa)	200	α	1,5
w (mm)	0,7	α	11,68
kb	1,4		

Pré-dimensionamento da geometria								
Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-B	20	20	14,29	3	6	8	12	7,60
2-B	25	25	17,86	3	6	8	12	7,10
3-B	35	30	21,43	3	6	8	12	6,10
4-B	45	40	28,57	3	6	8	12	5,10
5-B	20	20	14,29	4	8	10	16	11,60
6-B	25	25	17,86	4	8	10	14	9,10
7-B	35	30	21,43	4	8	10	14	8,10
8-B	45	40	28,57	4	8	10	14	7,10
9-B	20	20	14,29	5	10	13	21	16,60
10-B	25	25	17,86	5	10	13	19	14,10
11-B	35	30	21,43	5	10	13	18	12,10
12-B	45	40	28,57	5	10	13	16	9,10
13-B	20	20	14,29	6	12	15	27	22,60
14-B	25	25	17,86	6	12	15	25	20,10
15-B	35	30	21,43	6	12	15	23	17,10
16-B	45	40	28,57	6	12	15	20	13,10

Combinações de ELS e ELU							
Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
2-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76

3-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
4-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
5-B	4	3,9	1,5	9,4	8,5	8,35	13,16
6-B	3,5	3,9	1,5	8,9	8	7,85	12,46
7-B	3,5	3,9	1,5	8,9	8	7,85	12,46
8-B	3,5	3,9	1,5	8,9	8	7,85	12,46
9-B	5,25	3,9	1,5	10,65	9,75	9,6	14,91
10-B	4,75	3,9	1,5	10,15	9,25	9,1	14,21
11-B	4,5	3,9	1,5	9,9	9	8,85	13,86
12-B	4	3,9	1,5	9,4	8,5	8,35	13,16
13-B	6,75	3,9	1,5	12,15	11,25	11,1	17,01
14-B	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
15-B	5,75	3,9	1,5	11,15	10,25	10,1	15,61
16-B	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELS-cf		ELS-cr	
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)
1-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
2-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
3-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
4-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
5-B	13,36	4,86	13,60	4,95	15,04	5,47
6-B	12,56	4,57	12,80	4,66	14,24	5,18
7-B	12,56	4,57	12,80	4,66	14,24	5,18
8-B	12,56	4,57	12,80	4,66	14,24	5,18
9-B	24,00	8,74	24,38	8,87	26,63	9,69
10-B	22,75	8,28	23,13	8,42	25,38	9,24
11-B	22,13	8,05	22,50	8,19	24,75	9,01
12-B	20,88	7,60	21,25	7,74	23,50	8,55
13-B	39,96	14,55	40,50	14,74	43,74	15,92
14-B	38,16	13,89	38,70	14,09	41,94	15,27
15-B	36,36	13,24	36,90	13,43	40,14	14,61
16-B	33,66	12,25	34,20	12,45	37,44	13,63

Esforços característicos				
Modelo	ELU			
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Vsk,x (kN)	Vsk,y (kN)
1-B	10,58	3,85	13,23	8,82
2-B	10,58	3,85	13,23	8,82
3-B	10,58	3,85	13,23	8,82
4-B	10,58	3,85	13,23	8,82
5-B	21,06	7,66	19,74	13,16
6-B	19,94	7,26	18,69	12,46
7-B	19,94	7,26	18,69	12,46

8-B	19,94	7,26	18,69	12,46
9-B	37,28	13,57	27,96	18,64
10-B	35,53	12,93	26,64	17,76
11-B	34,65	12,61	25,99	17,33
12-B	32,90	11,98	24,68	16,45
13-B	61,24	22,29	38,27	25,52
14-B	58,72	21,37	36,70	24,47
15-B	56,20	20,46	35,12	23,42
16-B	52,42	19,08	32,76	21,84

Dimensionamento da armadura mínima e máxima					
Modelo	Md,min (kNm/m)	KMDmin	Kzmin	As,min (cm ² /m)	As max (cm ² /m)
1-B	5,52	0,07	0,96	1,80	48,00
2-B	6,40	0,07	0,95	2,17	48,00
3-B	7,23	0,09	0,94	2,89	48,00
4-B	8,76	0,12	0,92	4,28	48,00
5-B	9,81	0,05	0,97	2,40	64,00
6-B	8,71	0,06	0,96	2,29	56,00
7-B	9,84	0,07	0,96	2,92	56,00
8-B	11,92	0,08	0,95	4,08	56,00
9-B	16,90	0,04	0,97	3,15	84,00
10-B	16,05	0,05	0,97	2,85	76,00
11-B	16,27	0,05	0,97	3,20	72,00
12-B	15,57	0,07	0,96	4,11	64,00
13-B	27,93	0,04	0,98	4,05	108,00
14-B	27,79	0,04	0,98	3,75	100,00
15-B	26,56	0,04	0,97	3,68	92,00
16-B	24,33	0,05	0,97	4,40	80,00

Dimensionamento da armadura necessária na direção x								
Modelo	KMD	KZ	As (cm ²)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-B	0,1796	0,8786	5,10	3	34	20	6	12,06
2-B	0,1646	0,8873	5,41	3	34	20	6	12,06
3-B	0,1858	0,8718	6,41	4	25	20	6	12,06
4-B	0,1994	0,8638	7,74	4	25	20	6	12,06
5-B	0,1534	0,8985	6,51	4	25	20	6	12,06
6-B	0,1887	0,8718	8,09	5	20	20	6	12,06
7-B	0,1985	0,8636	9,18	5	20	20	6	12,06
8-B	0,1938	0,8678	10,42	6	17	17	7	14,07
9-B	0,1326	0,9130	7,92	4	25	20	6	12,06
10-B	0,1401	0,9094	8,92	5	20	20	6	12,06
11-B	0,1546	0,8985	10,26	6	17	17	7	14,07
12-B	0,1947	0,8678	13,42	7	15	15	8	16,08
13-B	0,1175	0,9236	9,45	5	20	20	6	12,06
14-B	0,1139	0,9270	10,15	6	17	17	7	14,07

15-B	0,1256	0,9166	11,54	6	17	17	7	14,07
16-B	0,1497	0,9022	14,28	8	13	13	9	18,10

Dimensionamento da armadura necessária na direção y

Modelo	KMD	KZ	As (cm ²)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-B	0,0654	0,9602	1,70	1	100	20	6	12,06
2-B	0,0599	0,9634	1,81	1	100	20	6	12,06
3-B	0,0676	0,9570	2,13	2	50	20	6	12,06
4-B	0,0726	0,9537	2,55	2	50	20	6	12,06
5-B	0,0558	0,9634	2,21	2	50	20	6	12,06
6-B	0,0687	0,9570	2,68	2	50	20	6	12,06
7-B	0,0723	0,9535	3,03	2	50	20	6	12,06
8-B	0,0705	0,9570	3,44	2	50	20	6	12,06
9-B	0,0483	0,9697	2,71	2	50	20	6	12,06
10-B	0,0510	0,9665	3,06	2	50	20	6	12,06
11-B	0,0563	0,9634	3,48	2	50	20	6	12,06
12-B	0,0709	0,9570	4,43	3	34	20	6	12,06
13-B	0,0428	0,9697	3,28	2	50	20	6	12,06
14-B	0,0415	0,9697	3,53	2	50	20	6	12,06
15-B	0,0457	0,9697	3,97	2	50	20	6	12,06
16-B	0,0545	0,9665	4,85	3	34	20	6	12,06

Verificação quanto à abertura de fissura

Verificação da cortante

Modelo	wk (mm)	wk lim (mm)	wk < wk lim	Modelo	Vrd2 (kN/m)	Vsd < Vrd2	Vrd1 (kN/m)	Vsd < Vrd1
1-A	0,30	0,40	OK!	1-A	244,29	OK!	58,72	OK!
2-A	0,26	0,40	OK!	2-A	285,27	OK!	65,42	OK!
3-A	0,23	0,40	OK!	3-A	294,11	OK!	67,68	OK!
4-A	0,19	0,40	OK!	4-A	327,86	OK!	69,30	OK!
5-A	0,30	0,40	OK!	5-A	372,86	OK!	76,86	OK!
6-A	0,26	0,40	OK!	6-A	365,63	OK!	76,18	OK!
7-A	0,23	0,40	OK!	7-A	390,54	OK!	80,00	OK!
8-A	0,19	0,40	OK!	8-A	456,43	OK!	94,89	OK!
9-A	0,31	0,40	OK!	9-A	533,57	OK!	98,05	OK!
10-A	0,27	0,40	OK!	10-A	566,52	OK!	101,72	OK!
11-A	0,23	0,40	OK!	11-A	583,39	OK!	107,90	OK!
12-A	0,19	0,40	OK!	12-A	585,00	OK!	114,86	OK!
13-A	0,32	0,40	OK!	13-A	726,43	OK!	121,28	OK!
14-A	0,27	0,40	OK!	14-A	807,59	OK!	133,44	OK!
15-A	0,24	0,40	OK!	15-A	824,46	OK!	135,29	OK!
16-A	0,20	0,40	OK!	16-A	842,14	OK!	147,92	OK!

Verificação quanto à flecha

Modelo	Mr (kNm/m)	Msk,cqp < Mr	$\delta_{cpq-ini}$ (mm)	δ_{∞} (mm)	δ_{lim} (mm)	$\delta < \delta_{lim}$
1-A	7,96	OK!	1,89	4,39	12	OK!

2-A	9,23	OK!	1,67	3,87	12	OK!
3-A	10,43	OK!	1,50	3,48	12	OK!
4-A	12,63	OK!	1,26	2,93	12	OK!
5-A	14,15	OK!	2,86	6,65	16	OK!
6-A	12,57	OK!	3,54	8,23	16	OK!
7-A	14,19	OK!	3,19	7,40	16	OK!
8-A	17,19	OK!	2,68	6,23	16	OK!
9-A	24,37	OK!	3,55	8,26	20	OK!
10-A	23,15	OK!	4,01	9,32	20	OK!
11-A	23,46	OK!	4,13	9,59	20	OK!
12-A	22,46	OK!	4,67	10,84	20	OK!
13-A	40,28	OK!	4,01	9,31	24	OK!
14-A	40,08	OK!	4,25	9,88	24	OK!
15-A	38,31	OK!	4,68	10,87	24	OK!
16-A	35,09	OK!	5,55	12,89	24	OK!

ANEXO C – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DO IBRACON
(2021)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
ffk	800	MPa	γ_c	25	kN/m ³	γ_g	1,4	-
Ce	0,8	-	γ_{rev}	20	kN/m ³	γ_q	1,4	-
γ_m	1,3	-	γ_{alv}	2,9	kN/m ²			
ffd	492	MPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
Ef	50	GPa	Ψ_1	0,4	-	μ_x/k_x	4,41	2,5
ϕ	12,5	mm	Ψ_2	0,3	-	μ_y/k_y	4,41	2,5

Valores adotados			
ϵ_{fu}	0,016	α_c	0,85
ϵ_{cu}	0,003	λ	0,8
φ	0,55	γ_c	1,4
Es (GPa)	200	α	1,5
w (mm)	0,7	α	11,68
kb	1,4		

Pré-dimensionamento da geometria								
Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-A	20	20	14,29	3	3	8	10	6,13
2-A	25	25	17,86	3	3	8	10	5,63
3-A	35	30	21,43	3	3	8	10	4,63
4-A	45	40	28,57	3	3	8	11	4,63
5-A	20	20	14,29	4	4	10	11	7,13
6-A	25	25	17,86	4	4	10	11	6,63
7-A	35	30	21,43	4	4	10	12	6,63
8-A	45	40	28,57	4	4	10	13	6,63
9-A	20	20	14,29	5	5	13	15	11,13
10-A	25	25	17,86	5	5	13	15	10,63
11-A	35	30	21,43	5	5	13	15	9,63
12-A	45	40	28,57	5	5	13	16	9,63
13-A	20	20	14,29	6	6	15	21	17,13
14-A	25	25	17,86	6	6	15	20	15,63
15-A	35	30	21,43	6	6	15	21	15,63
16-A	45	40	28,57	6	6	15	21	14,63

Combinações de ELS e ELU							
Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-A	2,5	3,9	1,5	7,9	7	6,85	11,06
2-A	2,5	3,9	1,5	7,9	7	6,85	11,06
3-A	2,5	3,9	1,5	7,9	7	6,85	11,06

4-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
5-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
6-A	2,75	3,9	1,5	8,15	7,25	7,1	11,41
7-A	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
8-A	3,25	3,9	1,5	8,65	7,75	7,6	12,11
9-A	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
10-A	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
11-A	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
12-A	4	3,9	1,5	9,4	8,5	8,35	13,16
13-A	5,25	3,9	1,5	10,65	9,75	9,6	14,91
14-A	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56
15-A	5,25	3,9	1,5	10,65	9,75	9,6	14,91
16-A	5,25	3,9	1,5	10,65	9,75	9,6	14,91

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELS-cf		ELS-cr	
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)
1-A	2,72	2,72	2,78	2,78	3,14	3,14
2-A	2,72	2,72	2,78	2,78	3,14	3,14
3-A	2,72	2,72	2,78	2,78	3,14	3,14
4-A	2,82	2,82	2,88	2,88	3,23	3,23
5-A	5,01	5,01	5,12	5,12	5,75	5,75
6-A	5,01	5,01	5,12	5,12	5,75	5,75
7-A	5,19	5,19	5,29	5,29	5,93	5,93
8-A	5,36	5,36	5,47	5,47	6,10	6,10
9-A	8,93	8,93	9,10	9,10	10,09	10,09
10-A	8,93	8,93	9,10	9,10	10,09	10,09
11-A	8,93	8,93	9,10	9,10	10,09	10,09
12-A	9,21	9,21	9,37	9,37	10,36	10,36
13-A	15,24	15,24	15,48	15,48	16,91	16,91
14-A	14,84	14,84	15,08	15,08	16,51	16,51
15-A	15,24	15,24	15,48	15,48	16,91	16,91
16-A	15,24	15,24	15,48	15,48	16,91	16,91

Esforços característicos				
Modelo	ELU			
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Vsk,x (kN)	Vsk,y (kN)
1-A	4,39	4,39	8,30	8,30
2-A	4,39	4,39	8,30	8,30
3-A	4,39	4,39	8,30	8,30
4-A	4,53	4,53	8,56	8,56
5-A	8,05	8,05	11,41	11,41
6-A	8,05	8,05	11,41	11,41
7-A	8,30	8,30	11,76	11,76
8-A	8,54	8,54	12,11	12,11

9-A	14,12	14,12	16,01	16,01
10-A	14,12	14,12	16,01	16,01
11-A	14,12	14,12	16,01	16,01
12-A	14,51	14,51	16,45	16,45
13-A	23,67	23,67	22,37	22,37
14-A	23,12	23,12	21,84	21,84
15-A	23,67	23,67	22,37	22,37
16-A	23,67	23,67	22,37	22,37

Dimensionamento da armadura necessária								
Modelo	pfb	pf	Af (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-A	0,0046	0,0074	0,29	1	100	20	6	7,36
2-A	0,0058	0,0074	0,34	1	100	20	6	7,36
3-A	0,0069	0,0086	0,51	1	100	18	7	8,59
4-A	0,0092	0,0089	0,46	1	100	15	8	9,82
5-A	0,0046	0,0100	0,36	1	100	14	9	11,04
6-A	0,0058	0,0112	0,43	1	100	12	10	12,27
7-A	0,0069	0,0102	0,52	1	100	12	10	12,27
8-A	0,0092	0,0094	0,61	1	100	12	10	12,27
9-A	0,0046	0,0082	0,34	1	100	12	10	12,27
10-A	0,0058	0,0082	0,37	1	100	12	10	12,27
11-A	0,0069	0,0090	0,46	1	100	10	11	13,50
12-A	0,0092	0,0084	0,43	1	100	10	11	13,50
13-A	0,0046	0,0064	0,35	1	100	10	11	13,50
14-A	0,0058	0,0067	0,37	1	100	10	11	13,50
15-A	0,0069	0,0064	0,37	1	100	10	11	13,50
16-A	0,0092	0,0064	0,46	1	100	10	11	13,50

Verificação quanto à abertura de fissura			
Modelo	wk (mm)	wk lim (mm)	wk < wk lim
1-A	0,58	0,70	OK!
2-A	0,62	0,70	OK!
3-A	0,70	0,70	OK!
4-A	0,49	0,70	OK!
5-A	0,62	0,70	OK!
6-A	0,57	0,70	OK!
7-A	0,63	0,70	OK!
8-A	0,60	0,70	OK!
9-A	0,66	0,70	OK!
10-A	0,68	0,70	OK!
11-A	0,70	0,70	OK!
12-A	0,64	0,70	OK!
13-A	0,66	0,70	OK!
14-A	0,68	0,70	OK!
15-A	0,64	0,70	OK!
16-A	0,57	0,70	OK!

Verificação quanto à flecha						
Modelo	Mr (kNm/m)	Msk,cqp < Mr	δ ,cpq-ini (mm)	δ_{∞} (mm)	δ_{lim} (mm)	$\delta < \delta_{lim}$
1-A	5,53	OK!	3,04	5,21	12	OK!
2-A	6,41	OK!	2,68	4,59	12	OK!
3-A	7,24	OK!	2,41	4,13	12	OK!
4-A	10,61	OK!	1,58	2,71	12	OK!
5-A	6,69	OK!	7,49	12,82	16	OK!
6-A	7,76	OK!	6,60	11,30	16	OK!
7-A	10,43	OK!	4,74	8,11	16	OK!
8-A	14,82	OK!	3,24	5,55	16	OK!
9-A	12,43	OK!	8,23	14,09	20	OK!
10-A	14,43	OK!	7,25	12,42	20	OK!
11-A	16,29	OK!	6,53	11,17	20	OK!
12-A	22,46	OK!	4,67	7,99	20	OK!
13-A	24,37	OK!	7,37	12,62	24	OK!
14-A	25,65	OK!	7,33	12,54	24	OK!
15-A	31,93	OK!	5,85	10,01	24	OK!
16-A	38,68	OK!	4,92	8,42	24	OK!

Verificação da cortante				
Modelo	Vrd2 (kN/m)	Vsd < Vrd2	Vrd1 (kN/m)	Vsd < Vrd1
1-A	196,88	OK!	43,77	OK!
2-A	226,00	OK!	47,99	OK!
3-A	222,99	OK!	50,55	OK!
4-A	297,32	OK!	63,04	OK!
5-A	229,02	OK!	54,78	OK!
6-A	266,18	OK!	63,23	OK!
7-A	319,42	OK!	71,41	OK!
8-A	425,89	OK!	86,50	OK!
9-A	357,59	OK!	75,11	OK!
10-A	426,90	OK!	84,57	OK!
11-A	464,06	OK!	92,28	OK!
12-A	618,75	OK!	111,79	OK!
13-A	550,45	OK!	102,44	OK!
14-A	627,79	OK!	111,79	OK!
15-A	753,35	OK!	126,24	OK!
16-A	940,18	OK!	146,33	OK!

ANEXO D – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DO IBRACON
(2021)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
ffk	800	MPa	γ_c	25	kN/m ³	γ_g	1,4	-
Ce	0,8	-	γ_{rev}	20	kN/m ³	γ_q	1,4	-
γ_m	1,3	-	γ_{alv}	2,9	kN/m ²			
ffd	492	MPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
Ef	50	GPa	Ψ_1	0,4	-	μ_x/k_x	10	3,75
ϕ	16	mm	Ψ_2	0,3	-	μ_y/k_y	3,64	2,5

Valores adotados			
ϵ_{fu}	0,016	α_c	0,85
ϵ_{cu}	0,003	λ	0,8
φ	0,55	γ_c	1,4
Es (GPa)	200	α	1,5
w (mm)	0,7	α	11,68
kb	1,4		

Pré-dimensionamento da geometria								
Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-B	20	20	14,29	3	6	8	12	7,60
2-B	25	25	17,86	3	6	8	12	7,10
3-B	35	30	21,43	3	6	8	15	9,10
4-B	45	40	28,57	3	6	8	15	8,10
5-B	20	20	14,29	4	8	10	16	11,60
6-B	25	25	17,86	4	8	10	15	10,10
7-B	35	30	21,43	4	8	10	17	11,10
8-B	45	40	28,57	4	8	10	17	10,10
9-B	20	20	14,29	5	10	13	23	18,60
10-B	25	25	17,86	5	10	13	24	19,10
11-B	35	30	21,43	5	10	13	25	19,10
12-B	45	40	28,57	5	10	13	25	18,10
13-B	20	20	14,29	6	12	15	44	39,60
14-B	25	25	17,86	6	12	15	38	33,10
15-B	35	30	21,43	6	12	15	37	31,10
16-B	45	40	28,57	6	12	15	34	27,10

Combinações de ELS e ELU							
Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
2-B	3	3,9	1,5	8,4	7,5	7,35	11,76
3-B	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
4-B	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81

5-B	4	3,9	1,5	9,4	8,5	8,35	13,16
6-B	3,75	3,9	1,5	9,15	8,25	8,1	12,81
7-B	4,25	3,9	1,5	9,65	8,75	8,6	13,51
8-B	4,25	3,9	1,5	9,65	8,75	8,6	13,51
9-B	5,75	3,9	1,5	11,15	10,25	10,1	15,61
10-B	6	3,9	1,5	11,4	10,5	10,35	15,96
11-B	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
12-B	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
13-B	11	3,9	1,5	16,4	15,5	15,35	22,96
14-B	9,5	3,9	1,5	14,9	14	13,85	20,86
15-B	9,25	3,9	1,5	14,65	13,75	13,6	20,51
16-B	8,5	3,9	1,5	13,9	13	12,85	19,46

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELS-cf		ELS-cr	
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)
1-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
2-B	6,62	2,41	6,75	2,46	7,56	2,75
3-B	7,29	2,65	7,43	2,70	8,24	3,00
4-B	7,29	2,65	7,43	2,70	8,24	3,00
5-B	13,36	4,86	13,60	4,95	15,04	5,47
6-B	12,96	4,72	13,20	4,80	14,64	5,33
7-B	13,76	5,01	14,00	5,10	15,44	5,62
8-B	13,76	5,01	14,00	5,10	15,44	5,62
9-B	25,25	9,19	25,63	9,33	27,88	10,15
10-B	25,88	9,42	26,25	9,56	28,50	10,37
11-B	26,50	9,65	26,88	9,78	29,13	10,60
12-B	26,50	9,65	26,88	9,78	29,13	10,60
13-B	55,26	20,11	55,80	20,31	59,04	21,49
14-B	49,86	18,15	50,40	18,35	53,64	19,52
15-B	48,96	17,82	49,50	18,02	52,74	19,20
16-B	46,26	16,84	46,80	17,04	50,04	18,21

Esforços característicos				
Modelo	ELU			
	Msk,x (kNm)	Msk,y (kN/m)	Vsk,x (kN)	Vsk,y (kN)
1-B	10,58	3,85	13,23	8,82
2-B	10,58	3,85	13,23	8,82
3-B	11,53	4,20	14,41	9,61
4-B	11,53	4,20	14,41	9,61
5-B	21,06	7,66	19,74	13,16
6-B	20,50	7,46	19,22	12,81
7-B	21,62	7,87	20,27	13,51
8-B	21,62	7,87	20,27	13,51
9-B	39,03	14,21	29,27	19,51

10-B	39,90	14,52	29,93	19,95
11-B	40,78	14,84	30,58	20,39
12-B	40,78	14,84	30,58	20,39
13-B	82,66	30,09	51,66	34,44
14-B	75,10	27,33	46,94	31,29
15-B	73,84	26,88	46,15	30,77
16-B	70,06	25,50	43,79	29,19

Dimensionamento da armadura necessária na direção x								
Modelo	pfb	pf	Af (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-B	0,0046	0,0117	0,45	1	100	18	7	14,07
2-B	0,0058	0,0134	0,56	1	100	16	8	16,08
3-B	0,0069	0,0094	0,52	1	100	18	7	14,07
4-B	0,0092	0,0094	0,63	1	100	18	7	14,07
5-B	0,0046	0,0126	0,50	1	100	12	10	20,11
6-B	0,0058	0,0134	0,56	1	100	12	10	20,11
7-B	0,0069	0,0130	0,65	1	100	11	11	22,12
8-B	0,0092	0,0130	0,76	1	100	10	11	22,12
9-B	0,0046	0,0096	0,50	1	100	10	11	22,12
10-B	0,0058	0,0092	0,52	1	100	10	11	22,12
11-B	0,0069	0,0088	0,57	1	100	10	11	22,12
12-B	0,0092	0,0088	0,55	1	100	10	11	22,12
13-B	0,0046	0,0050	0,53	1	100	10	11	22,12
14-B	0,0058	0,0058	0,54	1	100	10	11	22,12
15-B	0,0069	0,0060	0,56	1	100	10	11	22,12
16-B	0,0092	0,0065	0,65	1	100	10	11	22,12

Dimensionamento da armadura necessária na direção y								
Modelo	pfb	pf	Af (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	s adot (cm)	barras/m efe	Af,ef (cm ² /m)
1-B	0,0046	0,0101	0,48	1	100	20	6	12,06
2-B	0,0058	0,0101	0,61	1	100	20	6	12,06
3-B	0,0069	0,0080	0,55	1	100	20	6	12,06
4-B	0,0092	0,0080	0,44	1	100	20	6	12,06
5-B	0,0046	0,0075	0,59	1	100	20	6	12,06
6-B	0,0058	0,0080	0,66	1	100	20	6	12,06
7-B	0,0069	0,0071	0,80	1	100	20	6	12,06
8-B	0,0092	0,0071	0,44	1	100	20	6	12,06
9-B	0,0046	0,0052	0,62	1	100	20	6	12,06
10-B	0,0058	0,0050	0,34	1	100	20	6	12,06
11-B	0,0069	0,0048	0,41	1	100	20	6	12,06
12-B	0,0092	0,0048	0,51	1	100	20	6	12,06
13-B	0,0046	0,0027	0,46	1	100	20	6	12,06
14-B	0,0058	0,0032	0,48	1	100	20	6	12,06
15-B	0,0069	0,0033	0,53	1	100	20	6	12,06
16-B	0,0092	0,0035	0,62	1	100	20	6	12,06

Verificação quanto à abertura de fissura			
Modelo	wk (mm)	wk lim (mm)	wk < wk lim
1-B	0,68	0,70	OK!
2-B	0,60	0,70	OK!
3-B	0,58	0,70	OK!
4-B	0,64	0,70	OK!
5-B	0,59	0,70	OK!
6-B	0,68	0,70	OK!
7-B	0,60	0,70	OK!
8-B	0,68	0,70	OK!
9-B	0,69	0,70	OK!
10-B	0,67	0,70	OK!
11-B	0,68	0,70	OK!
12-B	0,65	0,70	OK!
13-B	0,68	0,70	OK!
14-B	0,69	0,70	OK!
15-B	0,68	0,70	OK!
16-B	0,69	0,70	OK!

Verificação quanto à flecha						
Modelo	Mr (kNm/m)	Msk,cqp < Mr	δ ,cpq-ini (mm)	δ_{∞} (mm)	δ_{lim} (mm)	$\delta < \delta_{lim}$
1-B	7,96	OK!	1,89	3,24	12	OK!
2-B	9,23	OK!	1,67	2,85	12	OK!
3-B	16,29	OK!	0,85	1,45	12	OK!
4-B	19,74	OK!	0,71	1,22	12	OK!
5-B	14,15	OK!	2,86	4,90	16	OK!
6-B	14,43	OK!	2,97	5,09	16	OK!
7-B	20,93	OK!	1,95	3,34	16	OK!
8-B	25,35	OK!	1,64	2,81	16	OK!
9-B	29,23	OK!	2,85	4,87	20	OK!
10-B	36,94	OK!	2,26	3,87	20	OK!
11-B	45,26	OK!	1,85	3,16	20	OK!
12-B	54,83	OK!	1,55	2,66	20	OK!
13-B	106,98	OK!	1,28	2,19	24	OK!
14-B	92,60	OK!	1,58	2,71	24	OK!
15-B	99,13	OK!	1,51	2,59	24	OK!
16-B	101,40	OK!	1,55	2,66	24	OK!

Verificação da cortante				
Modelo	Vrd2 (kN/m)	Vsd < Vrd2	Vrd1 (kN/m)	Vsd < Vrd1
1-B	244,29	OK!	62,11	OK!
2-B	285,27	OK!	69,61	OK!

3-B	438,75	OK!	90,42	OK!
4-B	520,71	OK!	102,27	OK!
5-B	372,86	OK!	90,05	OK!
6-B	405,80	OK!	96,90	OK!
7-B	535,18	OK!	119,50	OK!
8-B	649,29	OK!	132,81	OK!
9-B	597,86	OK!	121,77	OK!
10-B	767,41	OK!	143,51	OK!
11-B	920,89	OK!	162,05	OK!
12-B	1163,57	OK!	190,24	OK!
13-B	1272,86	OK!	187,51	OK!
14-B	1329,91	OK!	197,60	OK!
15-B	1499,46	OK!	215,46	OK!
16-B	1742,14	OK!	241,13	OK!

ANEXO E – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO A DO ACI 440-1R
(2015)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
ffk	800	MPa	γ_c	25	kN/m ³	γ_g	1,4	-
Ce	0,8	-	γ_{rev}	20	kN/m ³	γ_q	1,4	-
γ_m	1,3	-	γ_{alv}	2,9	kN/m ²			
ffd	492	MPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
Ef	50	GPa	Ψ_1	0,4	-	μ_x/k_x	4,41	2,5
ϕ	12,5	mm	Ψ_2	0,3	-	μ_y/k_y	4,41	2,5

Valores adotados

ϵ_{fu}	0,016
ϵ_{cu}	0,003
φ	0,55
Es (GPa)	200
w (mm)	0,7
kb	1,4

Pré-dimensionamento da geometria								
Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-A	20	20	14,29	3	3	24	20	17,375
2-A	25	25	17,86	3	3	24	20	16,875
3-A	35	30	21,43	3	3	24	20	15,875
4-A	45	40	28,57	3	3	24	20	14,875
5-A	20	20	14,29	4	4	31	25	22,375
6-A	25	25	17,86	4	4	31	25	21,875
7-A	35	30	21,43	4	4	31	25	20,875
8-A	45	40	28,57	4	4	31	25	19,875
9-A	20	20	14,29	5	5	39	35	32,375
10-A	25	25	17,86	5	5	39	35	31,875
11-A	35	30	21,43	5	5	39	35	30,875
12-A	45	40	28,57	5	5	39	35	29,875
13-A	20	20	14,29	6	6	47	37	34,375
14-A	25	25	17,86	6	6	47	37	33,875
15-A	35	30	21,43	6	6	47	37	32,875
16-A	45	40	28,57	6	6	47	37	31,875

Combinações de ELS e ELU							
Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-A	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56
2-A	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56
3-A	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56
4-A	5	3,9	1,5	10,4	9,5	9,35	14,56
5-A	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
6-A	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
7-A	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
8-A	6,25	3,9	1,5	11,65	10,75	10,6	16,31
9-A	8,75	3,9	1,5	14,15	13,25	13,1	19,81
10-A	8,75	3,9	1,5	14,15	13,25	13,1	19,81
11-A	8,75	3,9	1,5	14,15	13,25	13,1	19,81
12-A	8,75	3,9	1,5	14,15	13,25	13,1	19,81
13-A	9,25	3,9	1,5	14,65	13,75	13,6	20,51
14-A	9,25	3,9	1,5	14,65	13,75	13,6	20,51
15-A	9,25	3,9	1,5	14,65	13,75	13,6	20,51
16-A	9,25	3,9	1,5	14,65	13,75	13,6	20,51

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELU			
	Msk,x (kNm/m)	Msk,y (kNm/m)	Msk,x (kNm/m)	Msk,y (kNm/m)	Vsk,x (kN/m)	Vsk,y (kN/m)
1-A	3,71	3,71	5,78	5,78	10,92	10,92
2-A	3,71	3,71	5,78	5,78	10,92	10,92
3-A	3,71	3,71	5,78	5,78	10,92	10,92
4-A	3,71	3,71	5,78	5,78	10,92	10,92
5-A	7,48	7,48	11,51	11,51	16,31	16,31
6-A	7,48	7,48	11,51	11,51	16,31	16,31
7-A	7,48	7,48	11,51	11,51	16,31	16,31
8-A	7,48	7,48	11,51	11,51	16,31	16,31
9-A	14,44	14,44	21,84	21,84	24,76	24,76
10-A	14,44	14,44	21,84	21,84	24,76	24,76
11-A	14,44	14,44	21,84	21,84	24,76	24,76
12-A	14,44	14,44	21,84	21,84	24,76	24,76
13-A	21,59	21,59	32,56	32,56	30,77	30,77
14-A	21,59	21,59	32,56	32,56	30,77	30,77
15-A	21,59	21,59	32,56	32,56	30,77	30,77
16-A	21,59	21,59	32,56	32,56	30,77	30,77

Dimensionamento da armadura necessária							
Modelo	Af (cm ² /m)	Af,min (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	s adotado (cm)	barras/m ef	Af,ef (cm ² /m)
1-A	1,91	7,20	2	50	16	8	9,82
2-A	1,97	7,20	2	50	16	8	9,82
3-A	2,09	7,20	2	50	16	8	9,82

4-A	2,23	7,20	2	50	16	8	9,82
5-A	2,95	9,00	3	33	12	10	12,27
6-A	3,02	9,00	3	33	12	10	12,27
7-A	3,16	9,00	3	33	12	10	12,27
8-A	3,32	9,00	3	33	12	10	12,27
9-A	3,87	12,60	4	25	10	11	13,50
10-A	3,93	12,60	4	25	10	11	13,50
11-A	4,06	12,60	4	25	10	11	13,50
12-A	4,20	12,60	4	25	10	11	13,50
13-A	5,44	13,32	5	20	10	11	13,50
14-A	5,52	13,32	5	20	10	11	13,50
15-A	5,69	13,32	5	20	10	11	13,50
16-A	5,86	13,32	5	20	10	11	13,50

Verificação quanto à ruptura			
Modelo	dc (mm)	dc lim (mm)	dc < dc lim
1-A	26,25	172,82	OK!
2-A	31,25	163,23	OK!
3-A	41,25	143,83	OK!
4-A	51,25	126,18	OK!
5-A	26,25	139,42	OK!
6-A	31,25	133,58	OK!
7-A	41,25	121,39	OK!
8-A	51,25	110,17	OK!
9-A	26,25	138,33	OK!
10-A	31,25	134,35	OK!
11-A	41,25	125,93	OK!
12-A	51,25	118,08	OK!
13-A	26,25	85,77	OK!
14-A	31,25	83,55	OK!
15-A	41,25	78,70	OK!
16-A	51,25	74,20	OK!

Espaçamento máximo		
Modelo	s max	s max > s
1-A	46,07	OK!
2-A	44,84	OK!
3-A	42,23	OK!
4-A	38,33	OK!
5-A	37,26	OK!
6-A	36,52	OK!
7-A	34,87	OK!
8-A	30,39	OK!
9-A	31,44	OK!
10-A	31,03	OK!
11-A	28,87	OK!
12-A	25,25	OK!
13-A	22,42	OK!
14-A	21,43	OK!
15-A	18,15	OK!
16-A	14,90	OK!

Verificação quanto à flecha					
Modelo	Mcr (kNm/m)	Msd < Mcr	δ (mm)	δ máx (mm)	$\delta < \delta$ máx
1-A	15,62	OK!	0,77	6,25	OK!
2-A	17,47	OK!	0,69	6,25	OK!
3-A	19,13	OK!	0,63	6,25	OK!
4-A	22,09	OK!	0,55	6,25	OK!
5-A	24,41	OK!	1,40	8,33	OK!
6-A	27,29	OK!	1,26	8,33	OK!
7-A	29,90	OK!	1,15	8,33	OK!
8-A	34,52	OK!	0,99	8,33	OK!
9-A	47,84	OK!	1,52	10,42	OK!
10-A	53,49	OK!	1,36	10,42	OK!

11-A	58,60	OK!	1,24	10,42	OK!
12-A	67,66	OK!	1,08	10,42	OK!
13-A	53,47	OK!	11,49	12,50	OK!
14-A	59,78	OK!	6,90	12,50	OK!
15-A	65,48	OK!	2,59	12,50	OK!
16-A	75,62	OK!	1,96	12,50	OK!

Verificação da cortante		
Modelo	Vc	$Vc/2 > V$
1-A	249,52	OK!
2-A	259,11	OK!
3-A	261,60	OK!
4-A	269,36	OK!
5-A	316,96	OK!
6-A	330,30	OK!
7-A	336,02	OK!
8-A	348,93	OK!
9-A	403,99	OK!
10-A	422,36	OK!
11-A	432,98	OK!
12-A	453,20	OK!
13-A	417,14	OK!
14-A	436,27	OK!
15-A	447,66	OK!
16-A	469,01	OK!

ANEXO F – PLANILHA DE CÁLCULO PARA O MODELO B DO ACI 440-1R
(2015)

Características gerais								
Características da GFRP			Peso específico			Coeficiente de ponderação ELU		
ffk	800	MPa	γ_c	25	kN/m ³	γ_g	1,4	-
Ce	0,8	-	γ_{rev}	20	kN/m ³	γ_q	1,4	-
γ_m	1,3	-	γ_{alv}	2,9	kN/m ²			
ffd	492	MPa	Fator de redução ELS			Coeficientes de calc		
Ef	50	GPa	Ψ_1	0,4	-	μ_x/k_x	10	3,75
ϕ	16	mm	Ψ_2	0,3	-	μ_y/k_y	3,64	2,5

Valores adotados

ϵ_{fu}	0,016
ϵ_{cu}	0,003
ϕ	0,55
Es (GPa)	200
w (mm)	0,7
kb	1,4

Pré-dimensionamento da geometria

Modelo	Cob (mm)	fck (MPa)	fcd (MPa)	lx (m)	ly (m)	h (cm)	h adotado (cm)	dx (cm)
1-B	20	20	14,29	3	6	24	24	21,2
2-B	25	25	17,86	3	6	24	24	20,7
3-B	35	30	21,43	3	6	24	24	19,7
4-B	45	40	28,57	3	6	24	23	17,7
5-B	20	20	14,29	4	8	31	34	31,2
6-B	25	25	17,86	4	8	31	31	27,7
7-B	35	30	21,43	4	8	31	31	26,7
8-B	45	40	28,57	4	8	31	31	25,7
9-B	20	20	14,29	5	10	39	47	44,2
10-B	25	25	17,86	5	10	39	43	39,7
11-B	35	30	21,43	5	10	39	40	35,7
12-B	45	40	28,57	5	10	39	39	33,7
13-B	20	20	14,29	6	12	47	62	59,2
14-B	25	25	17,86	6	12	47	56	52,7
15-B	35	30	21,43	6	12	47	53	48,7
16-B	45	40	28,57	6	12	47	49	43,7

Combinações de ELS e ELU

Modelo	g1 (kN/m ²)	g2 (kN/m ²)	q (kN/m ²)	P-cr (kN/m ²)	Pcf (kN/m ²)	P-cqp (kN/m ²)	Pelu (kN/m ²)
1-B	6	3,9	1,5	11,4	10,5	10,35	15,96
2-B	6	3,9	1,5	11,4	10,5	10,35	15,96

3-B	6	3,9	1,5	11,4	10,5	10,35	15,96
4-B	5,75	3,9	1,5	11,15	10,25	10,1	15,61
5-B	8,5	3,9	1,5	13,9	13	12,85	19,46
6-B	7,75	3,9	1,5	13,15	12,25	12,1	18,41
7-B	7,75	3,9	1,5	13,15	12,25	12,1	18,41
8-B	7,75	3,9	1,5	13,15	12,25	12,1	18,41
9-B	11,75	3,9	1,5	17,15	16,25	16,1	24,01
10-B	10,75	3,9	1,5	16,15	15,25	15,1	22,61
11-B	10	3,9	1,5	15,4	14,5	14,35	21,56
12-B	9,75	3,9	1,5	15,15	14,25	14,1	21,21
13-B	15,5	3,9	1,5	20,9	20	19,85	29,26
14-B	14	3,9	1,5	19,4	18,5	18,35	27,16
15-B	13,25	3,9	1,5	18,65	17,75	17,6	26,11
16-B	12,25	3,9	1,5	17,65	16,75	16,6	24,71

Esforços característicos						
Modelo	ELS-cqp		ELU			
	Msk,x (kNm/m)	Msk,y (kNm/m)	Msk,x (kNm/m)	Msk,y (kNm/m)	Vsk,x (kN/m)	Vsk,y (kN/m)
1-B	9,32	3,39	14,36	5,23	17,96	11,97
2-B	9,32	3,39	14,36	5,23	17,96	11,97
3-B	9,32	3,39	14,36	5,23	17,96	11,97
4-B	9,09	3,31	14,05	5,11	17,56	11,71
5-B	20,56	7,48	31,14	11,33	29,19	19,46
6-B	19,36	7,05	29,46	10,72	27,62	18,41
7-B	19,36	7,05	29,46	10,72	27,62	18,41
8-B	19,36	7,05	29,46	10,72	27,62	18,41
9-B	40,25	14,65	60,03	21,85	45,02	30,01
10-B	37,75	13,74	56,53	20,58	42,39	28,26
11-B	35,88	13,06	53,90	19,62	40,43	26,95
12-B	35,25	12,83	53,03	19,30	39,77	26,51
13-B	71,46	26,01	105,34	38,34	65,84	43,89
14-B	66,06	24,05	97,78	35,59	61,11	40,74
15-B	63,36	23,06	94,00	34,21	58,75	39,17
16-B	59,76	21,75	88,96	32,38	55,60	37,07

Dimensionamento da armadura necessária na direção x							
Modelo	Af (cm ² /m)	Af,min (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	S adotado (cm)	barras/m ef	Af,ef (cm ² /m)
1-B	2,78	8,64	2	50	20	6	12,06
2-B	2,85	8,64	2	50	20	6	12,06
3-B	2,99	8,64	2	50	20	6	12,06
4-B	3,25	8,28	2	50	18	7	14,07
5-B	4,09	12,24	3	33	18	7	14,07
6-B	4,36	11,16	3	33	18	7	14,07
7-B	4,52	11,16	3	33	16	8	16,08
8-B	4,70	11,16	3	33	15	8	16,08

9-B	5,57	16,92	3	33	10	11	22,12
10-B	5,84	15,48	3	33	15	8	16,08
11-B	6,19	14,40	4	25	13	9	18,10
12-B	6,45	14,04	4	25	12	10	20,11
13-B	7,30	22,32	4	25	10	11	22,12
14-B	7,61	20,16	4	25	10	11	22,12
15-B	7,91	19,08	4	25	11	11	22,12
16-B	8,35	17,64	5	20	10	11	22,12

Dimensionamento da armadura necessária na direção y							
Modelo	Af (cm ² /m)	Af,min (cm ² /m)	barras/m	s (cm)	s ^s adotado (cm)	barras/m ef	Af,ef (cm ² /m)
1-B	1,01	8,64	1	100	20	6	12,06
2-B	1,04	8,64	1	100	20	6	12,06
3-B	1,09	8,64	1	100	20	6	12,06
4-B	1,18	8,28	1	100	20	6	12,06
5-B	1,49	12,24	1	100	18	7	14,07
6-B	1,59	11,16	1	100	20	6	12,06
7-B	1,65	11,16	1	100	20	6	12,06
8-B	1,71	11,16	1	100	20	6	12,06
9-B	2,03	16,92	2	50	14	9	18,10
10-B	2,12	15,48	2	50	16	8	16,08
11-B	2,25	14,40	2	50	16	8	16,08
12-B	2,35	14,04	2	50	19	7	14,07
13-B	2,66	22,32	2	50	10	11	22,12
14-B	2,77	20,16	2	50	11	11	22,12
15-B	2,88	19,08	2	50	12	10	20,11
16-B	3,04	17,64	2	50	14	9	18,10

Verificação quanto à ruptura			
Modelo	dc (mm)	dc lim (mm)	dc < dc lim
1-B	28,00	130,67	OK!
2-B	33,00	124,59	OK!
3-B	43,00	112,32	OK!
4-B	53,00	106,31	OK!
5-B	28,00	121,14	OK!
6-B	33,00	99,20	OK!
7-B	43,00	104,58	OK!
8-B	53,00	96,87	OK!
9-B	28,00	160,54	OK!
10-B	33,00	98,77	OK!
11-B	43,00	92,61	OK!
12-B	53,00	92,55	OK!
13-B	28,00	139,12	OK!
14-B	33,00	116,42	OK!
15-B	43,00	102,22	OK!

Espaçamento máximo		
Modelo	s max	s max > s
1-B	27,78	OK!
2-B	27,19	OK!
3-B	23,64	OK!
4-B	23,39	OK!
5-B	22,12	OK!
6-B	19,71	OK!
7-B	19,80	OK!
8-B	16,31	OK!
9-B	25,49	OK!
10-B	16,01	OK!
11-B	14,81	OK!
12-B	13,87	OK!
13-B	19,47	OK!
14-B	17,22	OK!
15-B	13,83	OK!

16-B	53,00	85,83	OK!	16-B	10,18	OK!
------	-------	-------	-----	------	-------	-----

Verificação quanto à flecha					
Modelo	M _{cr} (kNm/m)	M _{sd} < M _{cr}	δ (mm)	δ máx (mm)	δ < δ máx
1-B	22,50	OK!	0,49	6,25	OK!
2-B	25,15	OK!	0,44	6,25	OK!
3-B	27,55	OK!	0,40	6,25	OK!
4-B	29,22	OK!	0,39	6,25	OK!
5-B	45,15	OK!	0,67	8,33	OK!
6-B	41,96	OK!	0,75	8,33	OK!
7-B	45,97	OK!	0,68	8,33	OK!
8-B	53,08	OK!	0,59	8,33	OK!
9-B	86,28	OK!	0,76	10,42	OK!
10-B	80,74	OK!	0,84	10,42	OK!
11-B	76,53	OK!	0,91	10,42	OK!
12-B	84,01	OK!	0,83	10,42	OK!
13-B	150,13	OK!	0,84	12,50	OK!
14-B	136,94	OK!	0,95	12,50	OK!
15-B	134,37	OK!	0,98	12,50	OK!
16-B	132,62	OK!	1,02	12,50	OK!

Verificação da cortante		
Modelo	V _c	V _c /2 > V
1-B	152,72	OK!
2-B	159,05	OK!
3-B	161,58	OK!
4-B	174,68	OK!
5-B	201,91	OK!
6-B	199,75	OK!
7-B	217,34	OK!
8-B	227,02	OK!
9-B	300,10	OK!
10-B	257,64	OK!
11-B	268,21	OK!
12-B	291,13	OK!
13-B	350,93	OK!
14-B	347,67	OK!
15-B	347,60	OK!
16-B	349,59	OK!