



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**RENAN TEIXEIRA MENDES**

**REFORÇO DE BORDA DE ABERTURAS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO**  
**UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

**FORTALEZA**

**2017**

RENAN TEIXEIRA MENDES

REFORÇO DE BORDA DE ABERTURAS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO  
UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M492r Mendes, Renan Teixeira.  
Reforço de borda de aberturas em lajes de concreto armado utilizando fibra de carbono / Renan Teixeira Mendes. – 2017.  
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota.

1. Reforço. 2. Fibra de carbono. 3. Abertura em laje. I. Título.

CDD 620

---

RENAN TEIXEIRA MENDES

REFORÇO DE BORDA DE ABERTURAS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO  
UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Magnólia Maria Campêlo Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marisete Dantas de Aquino  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Ao meu avô, Otacílio.

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, depois à minha família, que sempre me apoiou em todas as decisões de minha vida e com prontidão atenderam a meus pedidos, por mais simples que fossem.

Ao meu avô, Otacílio, a quem dedico todas as conquistas de minha vida. Sem sua orientação e amor nada seria possível.

Aos meus pais, minha avó Solange, que sempre dedicaram suas vidas ao bem-estar de todos a sua volta e que estão presentes em todos os dias de minha vida.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Beatriz, sempre presentes em momentos de descontração e brincadeiras em família.

À minha namorada, Letícia, que sempre com imenso prazer recorro em todos os momentos de necessidade e felicidade e está sempre disposta a me orientar, compartilhando todas as emoções comigo.

Aos meus primos e amigos sinceros, Paulo, Pedro e Alice, com quem compartilhei os melhores momentos de minha infância e adolescência e permanecem ao meu lado para todas as situações.

Aos meus tios, Paulo e Hilzanir, que considero meus segundos pais e agradeço por muitas felicidades proporcionadas, por sempre estarem disponíveis em momentos de necessidade e juntos em todas as comemorações.

À minha Bisavó, Terezinha, tia Sandra e Júnior pelas comemorações em família, lembranças inesquecíveis e felicidades compartilhadas.

Aos meus amigos de curso e de vida, Victor, João, José e Ícaro, presentes durante todo o curso sempre lado a lado, formando a ainda não oficial, porém consolidada, Titanium.

Aos meus amigos que o colégio me deu, Filipe, Leornes, Joana, Deborah, Lanna, Letícia e Geovanna, que em todos os encontros que tivemos, proporcionaram momentos inesquecíveis fortalecendo e solidificando ainda mais nossos laços.

Ao professor Joaquim Mota, que sempre esteve disponível para me auxiliar na elaboração desse trabalho, fornecendo material e recursos necessários para sua finalização.

À Construtora Santo Amaro, Ricardo Miranda, João Bosco e Max, que me orientaram em diversas ocasiões e que estiveram sempre disponíveis para todo tipo de assunto.

A todos que de certa forma contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

## RESUMO

A fibra de carbono é um material que tem como principais características sua alta resistência e seu baixo peso. Por essas características únicas esse material é vastamente utilizado na indústria automobilística já desde o século passado, possibilitando grande redução de peso nos carros e melhorando suas características aerodinâmicas. Na construção civil, o material já é utilizado no Japão, Estados Unidos e na Europa desde a década de 1980 e é utilizado principalmente em reforço de estruturas. No reforço para aberturas em lajes, a fibra de carbono pode se apresentar como uma boa solução devido à sua facilidade de aplicação, que pode ser realizada por poucos homens e sem ferramentas específicas, e não necessidade de escoramento da estrutura a ser reforçada. Nesse trabalho, é feita, inicialmente, uma análise de esforços em lajes de diferentes tamanhos com diferentes aberturas, com a finalidade de se analisar a influência das dimensões da abertura com os esforços extras que surgem com ela. Além disso, a análise objetiva verificar a dispensa de verificações de aberturas em lajes presentes na NBR 6118 (2014). Após a análise das lajes, será apresentado um passo a passo de cálculo de reforço utilizando compostos de fibra de carbono aderidos externamente ao concreto através de um estudo de caso, em que será escolhida uma das lajes modeladas durante a análise. O reforço será calculado através de dois métodos, o primeiro que desconsidera a deformação pré-existente na peça a ser reforçada, o que remete à adoção de algumas ações antes da aplicação da fibra, e o segundo método que considera essa deformação devido à utilização normal da estrutura.

**Palavras-chave:** Reforço. Fibra de carbono. Abertura em laje.

## ABSTRACT

The carbon fiber is a synthetic material that presents, as main features the high traction resistance and low density. Because of these characteristics, carbon fiber is vastly used on the automotive industry since last century, making possible huge weight reduction on high performance cars and improving your aerodynamics. In the construction industry, carbon fiber used already in Japan, United States and Europe since 1980s with the main application at structures reinforce. On slab reinforcement, carbon fiber may presents as a good solution due the facility to application, that can be done for a few men and without specific set of tools, and because there is no need for shoring on the structure to be reinforced. On this study, initially an analysis of bending moments on slabs with different sizes and different apertures with the point of analyze the influence of the aperture dimensions on the extra moments that comes up with it. Besides that, the analysis has the objective of verify the exemption from verification of the apertures on slabs present on NBR 6118 (2014). After the slab analysis, a step by step of the calculation of the reinforcement using carbon fiber composites externally adhered to the concrete through a case study using a slab modelled during the analysis. The calculation of reinforcement will be done through two methods, the first does not consider the pre-existing deformation on slab, which lead the engineer to accomplish some tasks before the fiber application, and the second does consider that deformation caused due the normal use of the structure.

**Keywords:** Reinforcement. Carbon fiber. Slab aperture.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aumento da seção resistente de um pilar.....	18
Figura 2 - Reforço em viga utilizando chapas de aço aderidas ao concreto.....	19
Figura 3 - Esquema de protensão externa com ancoragem inferior à viga.....	20
Figura 4 - Representação esquemática do sistema CFRP.....	22
Figura 5 - Reforço com fibra de carbono no Viaduto de Santa Teresa .....	23
Figura 6 - Braço de alavanca do reforço aderido externamente .....	27
Figura 7 - Formulação para cálculo do alongamento limite da fibra para o descolamento.....	28
Figura 8 - Dimensões-limites para aberturas de lajes com dispensa de verificação.....	39
Figura 9 - Laje plena e com abertura de 20% dos vãos .....	41
Figura 10 - Distribuição de momento fletor em torno de x para a laje plena.....	42
Figura 11 - Distribuição de momento fletor em torno de x para a laje com a abertura.....	42
Figura 12 – Modelo simplificado de tensões na seção de uma viga de concreto armado submetida a um momento fletor positivo .....	44
Figura 13 - Resultante das forças na seção de uma viga de concreto armado submetida a momento fletor positivo .....	45
Figura 14 - Padrão de surgimento de momentos adicionais em torno do eixo x em aberturas em lajes .....	46
Figura 15 - Posicionamento do reforço em bordas livres e aberturas em lajes maciças .....	54
Figura 16 – Exemplo de reforço para abertura em laje .....	55

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação de incremento de momentos para a laje quadrada .....	32
Gráfico 2 - Relação de incremento de momentos para a laje armada em uma direção .....	33
Gráfico 3 - Relação de incremento de momentos para a laje $L_x/L_y = 1,2$ .....	36
Gráfico 4 - Relação de incremento de momentos para a laje $L_x/L_y = 1,4$ .....	36
Gráfico 5 - Relação de incremento de momentos para a laje $L_x/L_y = 1,6$ .....	37
Gráfico 6 - Relação de incremento de momentos para a laje $L_x/L_y = 1,8$ .....	37
Gráfico 7 - Resultado final das lajes .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das lajes.....	29
Tabela 2 - Resultado do processamento da laje quadrada ( $L_x/L_y = 1,0$ ) .....	31
Tabela 3 - Resultado do processamento de uma laje retangular ( $L_x/L_y = 2,0$ ).....	32
Tabela 4 - Resultados para as lajes intermediárias .....	35
Tabela 5 – Continuação dos resultados para as lajes intermediárias .....	35
Tabela 6 - Coeficientes de redução do incremento de momento nas lajes .....	38
Tabela 7 - Características físicas e mecânicas do CFRP .....	48

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	14
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	14
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	14
<i>1.1.3</i>	<i>Estrutura da monografia</i> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Técnicas de reforço estrutural</b> .....	16
<i>2.2.1</i>	<i>Aumento da seção resistente</i> .....	17
<i>2.2.2</i>	<i>Chapas metálicas aderidas ao concreto</i> .....	18
<i>2.2.3</i>	<i>Protensão externa</i> .....	19
<b>2.3</b>	<b>Polímero reforçado com fibra (PRF)</b> .....	20
<b>2.4</b>	<b>Fibra de Carbono</b> .....	21
<i>2.4.1</i>	<i>Constituição</i> .....	21
<i>2.4.2</i>	<i>Disponibilidade no mercado</i> .....	22
<i>2.4.3</i>	<i>Aplicações realizadas</i> .....	23
<i>2.4.4</i>	<i>Propriedades particulares</i> .....	24
<i>2.4.5</i>	<i>Preparação do substrato</i> .....	25
<i>2.4.6</i>	<i>Aplicação do laminado</i> .....	26
<i>2.4.7</i>	<i>Considerações sobre o dimensionamento do reforço</i> .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Lajes</b> .....	29
<b>3.2</b>	<b>Análise e estudo de caso</b> .....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	31
<b>4.1</b>	<b>Lajes extremas</b> .....	31
<b>4.2</b>	<b>Lajes intermediárias</b> .....	35
<b>4.3</b>	<b>Norma Brasileira</b> .....	39
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	41
<b>5.1</b>	<b>Problematização</b> .....	41
<b>5.2</b>	<b>Cálculo da armadura da laje</b> .....	43
<b>5.3</b>	<b>Cálculo do reforço com CFRP</b> .....	46
<i>5.3.1</i>	<i>Método 1</i> .....	47

5.3.2	<i>Método 2</i> .....	49
5.4	<b>Aplicação do reforço</b> .....	53
6	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	56
6.1	<b>Conclusão</b> .....	56
6.2	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	56
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento das indústrias leva aos engenheiros da área da construção civil o desafio de projetar reforços para as estruturas de concreto armado das edificações industriais sujeitas a constantes modificações. Por exemplo, a substituição de maquinários antigos por novos exige a compatibilização da estrutura com o novo layout e a execução de furações e aberturas nas lajes para passagem de tubulações. Estas intervenções devem ocorrer com o mínimo de interferência na operação da planta industrial de forma a minimizar o tempo de parada e possíveis prejuízos.

Para a realização de reforço estrutural, existem diversos métodos já consagrados no Brasil, entre eles os mais utilizados são o aumento da seção transversal, a utilização de chapas de aço aderidas externamente ao concreto e a protensão externa. A utilização de compostos de fibra de carbono ainda não é muito presente no mercado nacional devido ao seu maior custo em relação à técnica mais utilizada e difundida no Brasil que é, segundo Souza e Ripper (1998), o aumento da seção transversal já existente. No entanto, segundo Vieira (2014) os compostos de fibra de carbono já são utilizados na prática na Europa, Estados Unidos e Japão desde a década de 80, com comprovada eficácia e durabilidade.

São diversas as vantagens da utilização da fibra de carbono aderidas externamente ao concreto como método de reforço estrutural, citando as principais, temos: alterações praticamente nulas das dimensões originais das peças a serem reforçadas, visto que as lâminas e tecidos de fibra têm espessuras desprezíveis; o método de reforço não é destrutivo, pois não é necessário executar cortes e posterior recuperação do elemento a ser reforçado; na maioria dos casos não há a necessidade de escoramento na região de aplicação do reforço e o tempo de execução do reforço é bem menor comparado com o de outros métodos.

Apesar do custo mais alto do reforço, existem muitas vantagens que os compostos de fibra de carbono proporcionam e que não são oferecidas por outras técnicas de reforço. Pelas vantagens já citadas e outras que serão discutidas mais a frente nesse trabalho, a opção pela sua utilização deve ser considerada, pois a viabilidade do reforço deve considerar o custo global de aplicação.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

- Verificar numericamente a viabilidade e a eficiência da utilização de lâminas de fibra carbono para o reforço de borda de aberturas em lajes de concreto armado.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- Estabelecer um conjunto de casos de laje com aberturas que sejam representativos de situações reais;
- Fazer a análise numérica via elementos finitos dos casos selecionados obtendo esforços antes da abertura e após a abertura;
- Desenvolver uma sequência de cálculo do reforço de flexão utilizando fibra de carbono.

### ***1.1.3 Estrutura da monografia***

No capítulo 1, Introdução, é apresentada a importância do estudo das técnicas de reforço estrutural para a engenharia civil, assim como uma introdução ao estudo da utilização de compósitos de fibra de carbono em estruturas de concreto armado. Ainda nesse capítulo são apresentados os objetivos gerais e específicos que se deseja cumprir ao final do presente trabalho.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, que é a exposição de algumas definições e fornecimento de informações importantes relacionadas à utilização de fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto armado advindas de estudos de outros autores, partindo da definição de concreto armado, abordando as diferentes técnicas de reforço estrutural e as propriedades dos materiais utilizados junto a ele, e finalizando com informações gerais e específicas dos polímeros reforçados com fibra.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para o estudo de esforços nas bordas das aberturas em lajes e do cálculo do reforço com fibra de carbono em reforço para esses casos específicos considerando lajes maciças de concreto armado. Nesse capítulo será apresentado o passo a passo da pesquisa utilizando o software computacional para o cálculo

dos esforços e a montagem da sequência de cálculo do reforço utilizando compostos de fibra de carbono.

No capítulo 4 serão mostrados os resultados da análise no software obtidos após a modelagem das lajes com as devidas aberturas.

O capítulo 5 é um estudo de caso, em que é escolhida uma laje específica e que é calculado o reforço estrutural de fibra de carbono para as bordas da abertura na laje.

O capítulo 6 consiste na conclusão desse estudo realizado. Deseja-se, enfim, apresentar a viabilidade, apresentando quantitativos de fibra necessário para a realização do reforço, comprovando a eficiência do uso desse material relativamente novo no meio da construção civil no Brasil.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

Segundo Almeida (2002), o concreto vem sendo utilizado em construções há cerca de cem anos, e ainda, segundo ele, seu uso deve ter surgido, dentre outros fatores, da sua grande resistência à compressão e a capacidade de ser moldado nas formas desejadas.

De acordo com Bastos (2006), em meados dos anos 1900 se dá início, no Brasil, a utilização desse material com a construção de galerias de água em cimento armado e de pontes no estado do Rio de Janeiro.

O termo “Concreto Armado” só vem a ser utilizado alguns anos após as primeiras construções realizadas no Brasil: “[...] até cerca do ano de 1920 o concreto armado era chamado de “cimento armado””. (BASTOS, 2006. p.2)

O concreto armado é o principal sistema construtivo utilizado no Brasil, atualmente, segundo Santos (2008). Sabendo disso, esse material se tornou, mais intensamente, objeto de diversas pesquisas nas últimas décadas. No decorrer desses anos, o crescimento da população e aumento do porte de equipamentos e maquinário é incontestável, o que acarreta no inevitável aumento das cargas presente nas estruturas já concebidas.

A necessidade do aumento da capacidade resistente de peças de concreto armado é cada vez mais comum, seja pela mudança do uso, falta de manutenção ou erros na execução de estruturas, seja pela necessidade de se fazer aberturas em lajes e vigas ou até para a segurança de construções históricas. Essa necessidade remete à adoção de técnicas de reforço estrutural para o aumento da resistência das edificações, assunto que será abordado no tópico seguinte.

### **2.2 Técnicas de reforço estrutural**

Quando constatada a necessidade de se realizar reforço em qualquer que seja a estrutura, o engenheiro projetista deve analisar as diferentes técnicas existentes e analisar os custos envolvidos em cada opção. A adoção de técnicas já consagradas é muito comum nesses casos, mas a depender da necessidade de velocidade de execução necessária e disponibilidade e custo de mão de obra, é imprescindível a verificação de outras soluções.

É dever do projetista, nestes casos, esclarecer o proprietário sobre as diversas hipóteses que porventura existam - se existir mais do que uma -, comparando custos de execução e qualidade final (resultado do trabalho), seguranças a serem atingidas em cada caso e previsão dos gastos futuros com manutenção, ou seja,

estipulação, com base nestes elementos, da nova vida útil da estrutura. Somente assim poderá o proprietário estar apto a decidir, sempre aconselhado pelo especialista, pela execução dos serviços de recuperação e/ou reforço, ou, por outro lado, pela não intervenção, ou ainda pela demolição e reconstrução, total ou parcial, da estrutura. (SOUZA E RIPPER, 1998, p. 106)

Para o estudo das vantagens e desvantagens da utilização de fibras de carbono para o reforço de estruturas de concreto armado, deve-se conhecer as outras técnicas existentes no mercado mais a fundo. Portanto, serão apresentadas nos próximos tópicos as técnicas mais presentes no reforço de estruturas no Brasil.

### ***2.2.1 Aumento da seção resistente***

Souza e Ripper (1998) apresentam a técnica do aumento da seção resistente como a opção indubitavelmente mais utilizada no Brasil. Ainda segundo Souza e Ripper (1998), existem algumas características desse tipo de reforço que o torna o mais presente em todo território nacional, listando e explicando algumas delas:

a) material utilizado

- utiliza-se concreto e o mesmo aço utilizado no concreto armado, o CA-50, que são materiais normalmente comprados em grande escala na construção civil e têm preços relativamente menores que outras opções.

b) mão de obra

- os materiais estão presentes em todas as obras de edifícios do Brasil há muitos anos e não é necessária mão de obra especializada para seu manuseio.

Esse tipo de reforço pode ser realizado em pilares, técnica conhecida como encamisamento de pilar, que consiste no projeto de um aumento da seção do pilar formando uma espécie de cinta ao redor do pilar a ser reforçado. Em vigas em lajes, o reforço se dá pelo aumento da altura da seção transversal, promovendo uma maior resistência da peça pelo aumento do braço de alavanca resistente.

Figura 1 - Aumento da seção resistente de um pilar



Fonte: <http://techniques.com.br/> - acesso em 10/09/2017

As principais problemáticas desse tipo de reforço são: a alteração das dimensões em que a estrutura original foi concebida, como é possível notar na Figura 1, o que pode ser incômodo para estruturas residenciais e comerciais por uma possível diminuição da área útil provocada pelo aumento da seção de pilares e possível diminuição da altura de forros ou ocorrência de vigas aparentes como resultado do aumento da altura de vigas, e a necessidade da interrupção parcial do uso da estrutura para a aplicação do reforço, sendo esse fato de grande importância para a escolha do tipo de reforço a ser utilizado.

### ***2.2.2 Chapas metálicas aderidas ao concreto***

A adição de chapas metálicas a estruturas de concreto armado é uma técnica bastante presente e eficaz, dado que é possível aumentar significativamente a resistência alguns elementos, sendo recomendado considerar um aumento máximo, segundo Souza e Ripper (1998), de 50% da resistência inicial, mesmo que o cálculo indique valores maiores.

Figura 2 - Reforço em viga utilizando chapas de aço aderidas ao concreto



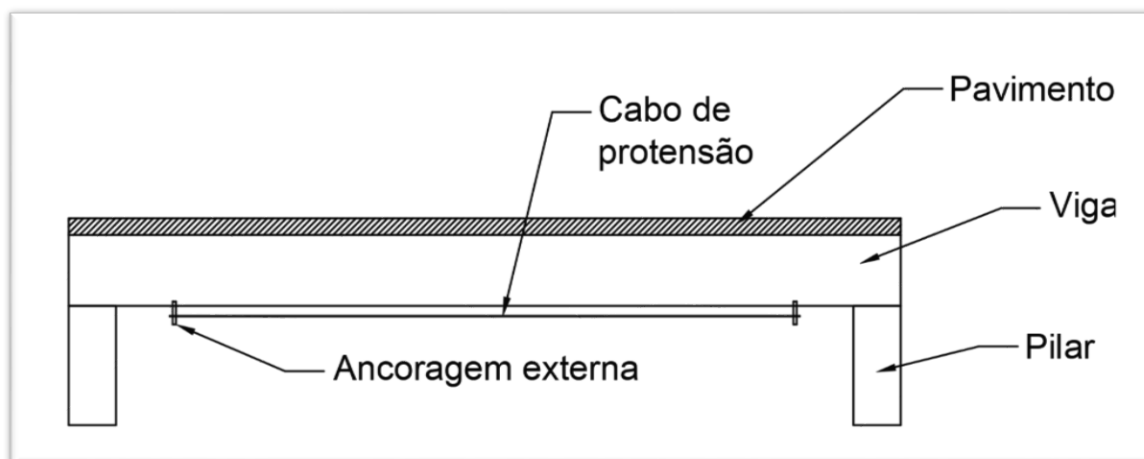
Fonte: <https://www.ufrgs.br/eso/content/?p=1141> – acesso em 10/09/2017

As estruturas de concreto reforçadas com a colagem de chapas metálicas são calculadas trabalhando como estruturas mistas e seu cálculo deve resultar nos comprimentos de ancoragem das chapas metálicas e nas áreas de aço necessárias. Existem diversas técnicas para o cálculo desse tipo de reforço, sejam brasileiras ou internacionais, o resultado do roteiro de cálculo deve ser a área de aço necessária para o aumento da resistência do elemento seja para flexão ou cisalhamento. Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), o cálculo do comprimento de ancoragem é feito utilizando equilíbrio de forças e a resistência da resina de colagem deve ser obtida experimentalmente.

### ***2.2.3 Protensão externa***

“O sistema de protensão externa baseia-se em cordoalhas colocadas depois de ter feito a concretagem da peça. Quando esta adquiriu a resistência necessária, entesam-se as cordoalhas externas.” (TEJEDOR, 2013, p.56).

Figura 3 - Esquema de protensão externa com ancoragem inferior à viga



Fonte: Autor (2017)

“Desde 1950 a protensão externa vem sendo largamente utilizada para o reforço de vigas de pontes de diversos tipos: de concreto armado, de concreto protendido, de aço e mistas.” (ALMEIDA, 2001, p.13). A protensão externa é uma técnica largamente utilizada para reforço de vigas de pontes, pois nessas estruturas ocorrem, naturalmente, variações das cargas de trabalho devido ao aumento da capacidade de carga dos veículos com o passar dos anos e uma das características dessa técnica é a capacidade de reprotensão dos cabos, visto que os cabos de protensão não são aderidos ao concreto.

Além disso, essa técnica apresenta outras características que a confere boa capacidade de adaptação, são elas:

- a) Possível alteração das posições dos cabos de protensão, possibilitando o aumento ou diminuição da carga equivalente de protensão na viga;
- b) Peso relativamente baixo do reforço;
- c) Menores perdas por atrito que a protensão tradicional.

### 2.3 Polímero reforçado com fibra (PRF)

As fibras já vêm sendo amplamente utilizadas em indústrias como a aeroespacial, automotiva, têxtil, entre outras. O seu crescimento na construção civil ocorre devido à necessidade de recuperação e reforço de estruturas por quaisquer razões. A sua utilização é marcante na área de reforço estrutural pois as fibras apresentam baixo peso específico, boa resistência mecânica e grande durabilidade, quando bem aplicadas.

Os tipos de fibra comumente utilizados no sistema FRP, segundo o ACI 440.2R (2008), são as GFRP (Polímero reforçado com fibra de vidro), AFRP (Polímero reforçado com

fibra de aramida) e de CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono). O sistema de reforço que utiliza FRP aderido ao concreto mais presente na construção civil utiliza a fibra de carbono como elemento resistente à tração devido a suas características mecânicas superiores aos outros tipos de fibras devido ao seu grande módulo de elasticidade, variando de 220 a 240 GPa para as fibras de alta resistência à tração e chegando até 650 GPa para as fibras de ultra-alto módulo, ainda segundo o ACI-440.2R (2002).

## **2.4 Fibra de Carbono**

Segundo Vieira (2014), os compósitos de fibra de carbono já são discutidos num laboratório de pesquisa suíço desde a década de 80, sendo a técnica difundida e aplicada na prática na Europa, Estados Unidos, Canadá e Japão desde então.

Entre as diversas maneiras de se fazer o reforço de estruturas de concreto, a utilização de compostos com fibra de carbono se destaca por algumas de suas características como o baixo peso das peças necessárias para o reforço das estruturas, que geralmente é desprezado no cálculo do mesmo, pela sua pequena espessura, praticamente não alterando as dimensões iniciais da peça reforçada e pelo fato de ser um material que apresenta grande resistência à tração.

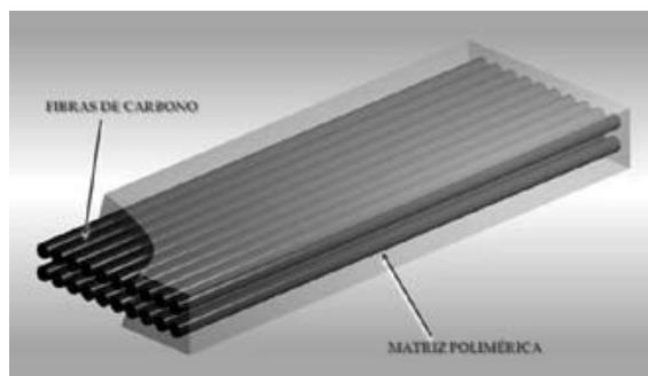
### **2.4.1 Constituição**

Segundo Machado e Machado (2015), os sistemas estruturados com fibra de carbono são constituídos de dois elementos distintos e fundamentais, são eles:

- a) Matriz polimérica
- b) Elemento estrutural

A matriz polimérica tem algumas funções importantes para a formação do compósito, a principal delas é a de distribuir a tensão de tração que surge no substrato de concreto devido aos esforços de carregamentos da estrutura para as fibras, de modo que elas atuem resistindo aos esforços de tração. Além disso, Testoni (2011) afirma que a matriz polimérica tem funções mais abrangentes, como proteger as fibras individuais contra danos superficiais, provenientes de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente, separar as fibras umas das outras, prevenindo a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra.

Figura 4 - Representação esquemática do sistema CFRP



Fonte: Machado e Machado (2015)

Para prevenir a ruptura frágil do sistema, - modo de ruptura que é indesejável para as estruturas - a matriz polimérica deve apresentar ruptura dúctil, pois, como citado anteriormente, a matriz atua mantendo as fibras resistindo à tração mesmo após a ruptura de fibras isoladas que, por sua vez, apresentam ruptura frágil.

O elemento estrutural, no caso do CFRP é a fibra de carbono, que são materiais de pequeno diâmetro e de orientação unidirecional e que possuem ótimas propriedades mecânicas e físicas, tais como alta resistência à tração e baixo peso específico, respectivamente. “Possuem os maiores módulos específicos e as maiores resistências específicas dentre todos os materiais fibrosos de reforço, retendo seus elevados módulos de tração e suas grandes resistências mesmo a temperaturas elevadas.” (TESTONI, 2011).

#### ***2.4.2 Disponibilidade no mercado***

Atualmente, no Brasil, a utilização da fibra de carbono como reforço estrutural ainda não é tão presente como em países como Japão e Estados Unidos, mas já existem diferentes empresas que fornecem a matéria prima para sua execução e também escritórios de cálculo estrutural que realizam o dimensionamento de reforço com fibra de carbono.

O sistema de reforço que utiliza fibra reforçadas com polímero está presente de diferentes maneiras no mercado, são elas:

- a) barra;
- b) tecido;
- c) laminado.

A forma mais presente do CFRP no mercado é em laminado, pois “A orientação unidirecional das fibras do laminado lhe confere a maximização da resistência e da rigidez na

direção longitudinal.” (ARQUEZ, 2010), o que a torna mais atraente para o uso em reforço de estruturas do que as outras formas.

### 2.4.3 Aplicações realizadas

No mundo, segundo Machado e Machado (2015), a fibra de carbono já vem sendo utilizada como reforço estrutural pelos japoneses aproximadamente desde o ano de 1980 para resistir a esforços provenientes de atividades sísmicas, muito presentes no país. No início os materiais eram muito caros, o que inviabilizava, em muitos casos, a sua utilização, mas, com o passar dos anos, a industrialização e evolução da tecnologia fez com que seu custo diminuísse, fazendo com que o CRFP se tornasse competitivo com outros métodos de reforço já utilizados.

“O sistema composto foi introduzido no Brasil em 1998 com o reforço pioneiro do Viaduto de Santa Teresa, em Belo Horizonte [...]” (REVISTA TÉCNICA, 2007). Projeto do engenheiro Ari de Paula Machado, esse caso foi a primeira aplicação de compósitos de fibra de carbono na América Latina.

Figura 5 - Reforço com fibra de carbono no Viaduto de Santa Teresa



Fonte: Revista Técnica – 2007 (<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-1.aspx>)

Desde então, a fibra de carbono é utilizada no Brasil em obras que necessitam de agilidade no reforço ou recuperação e não é possível a paralisação de serviços no local que necessita de reforço. Como exemplo temos o estádio Maracanã, em que a obra necessitava de agilidade devido à realização da Copa do Mundo de Futebol de 2014, com sede no Brasil, A revista Técnica (2013), em sua 127ª edição, cita, quanto ao seu reforço estrutural:

Além dos pilares, um trecho de 14 mil m<sup>2</sup> da arquibancada antiga do estádio também teve de ser reforçado. Com a malha de aço, seriam consumidos cerca de 75 dias de obra, com 32 pessoas trabalhando no reforço desse elemento. Após diversas reuniões, o contratante optou novamente pelo reforço com tela de fibra de carbono, executado em 22 dias por apenas duas pessoas.

As principais aplicações da fibra se dão em casos de reforço de laje para aumento da sobrecarga, reforço de pilares à flexão e compressão, reforço de vigas à flexão e cortante. Muito utilizada inicialmente em estruturas mais robustas, atualmente vem se tornando uma boa opção também para estruturas de menor porte, tendo em vista o custo da mão de obra, considerando o número de trabalhadores e o tempo de execução.

#### ***2.4.4 Propriedades particulares***

Algumas características e propriedades do material composto reforçado com fibra de carbono fazem com que o material, quando utilizado em reforço de estruturas de concreto armado, apresente grande desempenho na absorção de esforços direcionados inicialmente à estrutura. A seguir serão apresentadas algumas características particulares dos compósitos reforçados com fibra de carbono:

- Baixo peso específico

O baixo peso específico dos laminados e tecidos reforçados com fibra de carbono proporcionam alguns aspectos positivos para seu uso, são eles: a desconsideração do peso do reforço no cálculo do mesmo pelo projetista do reforço e a melhor trabalhabilidade no local pelos aplicadores, não necessitando do uso de máquinas para o içamento e nem de grandes caminhões para seu transporte, o que também faz com que a equipe necessária para a aplicação do reforço seja bastante reduzida em relação a métodos convencionais.

- Fácil aplicação

Não é necessário maquinário específico para a instalação do reforço na sua forma laminada e em tecido, sendo suficiente, geralmente, apenas rolos para aplicação e retirada do excesso de primer e das resinas e tesouras, facas e estiletes para cortar as lâminas nas dimensões desejadas.

- Aderência externa

Por serem externamente aderidos, eles possuem maior gama de aplicações, que se estende a lajes, vigas, pilares, silos e torres, por exemplo.

- Pequena espessura

Suas pequenas espessuras de reforço são um grande ponto positivo para esse material, que fazem com que os elementos reforçados com ele praticamente não sofram alteração de dimensões, não aumentando a seção dos elementos nem diminuindo áreas úteis dos ambientes.

- Durabilidade

Os materiais, por não terem metais em sua composição, não apresentam risco de corrosão devido à oxidação e apresentam bons desempenhos em relação a resistência ao fogo, quando aplicadas as proteções necessárias.

- Mão de obra e agilidade na execução

A quantidade reduzida de trabalhadores necessários para a aplicação do reforço, juntamente com o tempo de execução são, por muitas vezes, o principal motivo da escolha desse tipo de solução. Pode-se citar o exemplo do estádio maracanã já mencionado anteriormente em que apenas duas pessoas reforçaram a estrutura de 14 mil metros quadrados de arquibancada em apenas 22 dias.

#### ***2.4.5 Preparação do substrato***

A aplicação do laminado deve ser feita no substrato de concreto previamente limpo e livre de fissuras. Caso o concreto apresente problemas quanto à resistência na área em que vai ser aderida ao sistema CFRP, a superfície deve ser reparada e preparada para a recepção do mesmo. Machado e Machado (2015) indicam, para a preparação do substrato de concreto:

- a) Todas as trincas e fissuras existentes na estrutura a ser reforçada devem ser devidamente recuperadas;
- b) O concreto da área e periferias não deve apresentar deterioração, ou seja, deve ter uma superfície sã e íntegra;
- c) Armaduras que apresentam corrosão devem ser recuperadas com a colocação de armadura suplementar, com recomendação de construção de ponte de aderência, para suprir a redução de diâmetro;
- d) Não devem haver irregularidades na superfície, tais como depressões ou elevações;
- e) O concreto deve apresentar resistência de arrancamento igual ou maior que 14 MPa, para isso, pode ser realizado o teste conhecido como “pull-test”<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Pull-test consiste em um ensaio em que uma placa metálica é aderida ao concreto e, após o tempo de cura do adesivo, a placa é tracionada até que corra o descolamento do concreto aderido à placa do resto do elemento. O resultado do teste é a resistência de arrancamento do concreto.

#### **2.4.6 Aplicação do laminado**

A aplicação do laminado requer a preparação da superfície citada no tópico anterior e, após realizada, a sequência da aplicação será apresentada a seguir:

a) Primer

O primer funciona da mesma maneira que o imprimador asfáltico no caso da aplicação de mantas de impermeabilização, ou seja, ele promove a melhor aderência entre o concreto e o elemento que será “colado” externamente, através da penetração do produto nos poros do concreto.

b) Massa reguladora

A massa é utilizada para a regularização da superfície, ela atua removendo as depressões e elevações que podem ocasionar esforços não desejados no conjunto reforço-substrato.

c) Primeira camada de resina saturante

Após a regularização do substrato, é aplicada a primeira camada da resina saturante, que pode ser feita no substrato ou no próprio laminado, anteriormente posicionado em mesas com essa finalidade. A resina saturante vai agir como uma cola, aderindo a fibra de carbono ao concreto. Não se deve exagerar na aplicação de resina, visto que, em excesso, ela acaba diminuindo a eficácia no reforço.

d) Aplicação da fibra de carbono

Enfim, a fibra deve ser aplicada imediatamente após a primeira camada da resina saturante, podendo o aplicador corrigir sua posição e seguindo o projeto de reforço.

e) Segunda camada de resina saturante

Após a aplicação da fibra em si, deve ser aplicada uma segunda camada da resina em cima da fibra (sempre deve ser aplicada após a aplicação da fibra), para, finalmente, envolver completamente a fibra na resina ou preparar o local para a aplicação de uma terceira camada de resina saturante, que servirá como base para uma segunda camada de fibra.

f) Acabamento

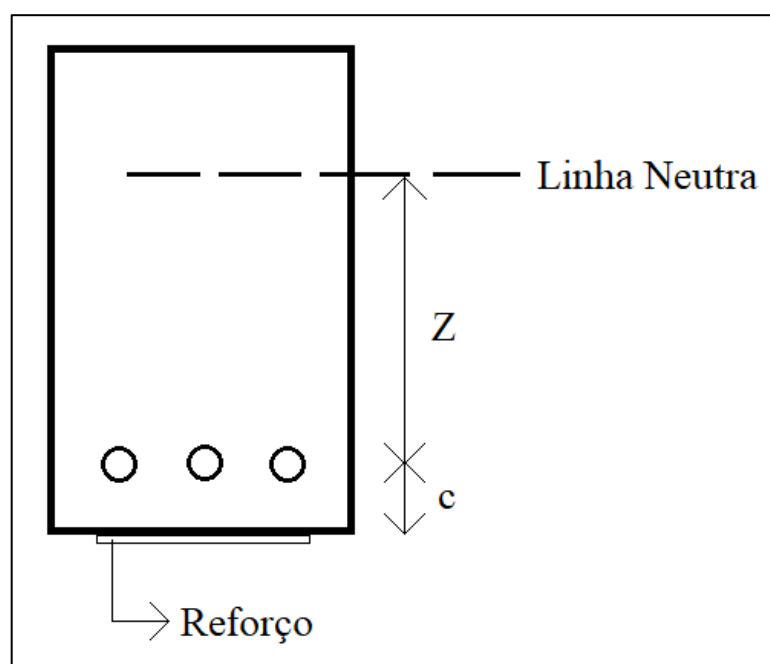
Após a aplicação de todas as camadas de resina saturante, o acabamento pode ser aplicado para proteger ainda mais o sistema CFRP de ações externas, como o fogo ou dar o acabamento estético desejado.

### 2.4.7 Considerações sobre o dimensionamento do reforço

A estrutura reforçada com sistemas CFRP, segundo Machado (2015), podem sofrer ruptura de diferentes maneiras, são elas: esmagamento do concreto por compressão antes do escoamento do aço das armaduras, escoamento do aço seguido pela ruptura do laminado de fibra de carbono, escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto, arrancamento do concreto fixado ao sistema CFRP e descolamento do laminado do substrato de concreto.

No dimensionamento do reforço de vigas ou lajes com a fibra aderida externamente ao concreto, é considerado que a fibra trabalha em conjunto com o concreto e o aço. Sendo assim, é adotado que existe uma força resistente de tração na fibra que, na seção transversal, vai trabalhar formando momento com um braço de alavanca igual ao do aço de armadura passiva somado ao recobrimento desse aço, como indica a Figura 6.

Figura 6 - Braço de alavanca do reforço aderido externamente



Fonte: Autor (2017)

Para a consideração ser real, deve existir uma área de colagem suficiente para a transferência dos esforços de cisalhamento que existirão na superfície de contato concreto-reforço. A ancoragem também deve ser calculada de modo que obedeça às recomendações normativas vigentes, nesse caso, pode-se seguir o ACI 440-2R (2008).

No cálculo do reforço com fibra de carbono, ainda é utilizado um fator de redução na resistência da fibra de carbono: “Esse fator de redução ( $\Psi_f$ ) está definido na ACI 440 –

10.2.10 com base nas análises de confiabilidade (...) e que foram baseadas nas propriedades calibradas estatisticamente da resistência à flexão, conforme Okeil et al. - 2007” (MACHADO e MACHADO, 2015)

Ao se dimensionar o reforço com CFRP, a verificação de descolamento da fibra aderida externamente é necessária. O ACI 440-2R (2008), no seu item 10.1.1, apresenta uma equação para o cálculo da deformação limite das fibras aderidas ao concreto (Figura 7), para esse trabalho será utilizado o limite superior também fornecido pelo ACI 440-2R (2008) igual a 90% da deformação no estado limite último da fibra.

Figura 7 - Formulação para cálculo do alongamento limite da fibra para o descolamento

$$\varepsilon_{fd} = 0.083 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad \text{in in.-lb units}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad \text{in SI units}$$

Fonte: ACI 440-2R (2008)

### 3 METODOLOGIA

A necessidade de reforço estrutural para aberturas em lajes pode ser analisada a partir de softwares de análise estrutural que utilizam elementos finitos para a modelagem de estruturas e, para esse trabalho, será utilizado o software MIDAS CIVIL para o estudo de esforços que surgirão nos bordos das aberturas.

#### 3.1 Lajes

As lajes que serão criadas no software serão do tipo maciças com 12 cm de altura e com uma sobrecarga de 5,0 kN/m<sup>2</sup>. Quanto às condições de apoio das lajes, serão modeladas como simplesmente apoiadas nos quatro lados, ou seja, não apresentam continuidade.

A análise de momentos será dividida, inicialmente, em duas partes. Primeiro será realizada a análise de momentos antes das aberturas e depois ela será refeita após as aberturas. Também serão considerados diversos tipos de lajes de modo que seja possível avaliar a influência da retangularidade da laje em relação ao incremento de momentos gerados que deverá acontecer com as aberturas. Além disso, será possível a simulação de dois tipos de lajes diferentes, são elas:

- a) Laje armada em uma direção;
- b) Laje armada em duas direções.

Para a representação das lajes armadas em uma direção, será utilizada uma laje de 5 metros de largura por 10 metros de comprimento. Já para a modelagem das lajes armadas em duas direções, serão consideradas uma laje quadrada de 5 metros de lado e lajes retangulares com relação  $l_x/l_y$  variando em 0,2 a cada modelagem, da seguinte maneira:

Tabela 1 - Dimensões das lajes

<b>Lx/Ly</b>	<b>Lx (m)</b>	<b>Ly (m)</b>
<b>1,0</b>	5	5
<b>1,2</b>	6	5
<b>1,4</b>	7	5
<b>1,6</b>	8	5
<b>1,8</b>	9	5
<b>2,0</b>	10	5

Fonte: Autor (2017)

Já para as dimensões das aberturas, serão seguidos os seguintes critérios:

- a) As dimensões das aberturas sempre seguirão as proporções das dimensões das lajes;
- b) As dimensões das aberturas irão variar de 5 a 50% dos vãos da laje, variando de 5% a cada modelagem.

### **3.2 Análise e estudo de caso**

Após a preparação dos modelos, serão realizadas as análises de momentos máximos da laje, que possivelmente ocorrerão nos bordos das aberturas desejando-se construir um gráfico que relacione o momento máximo nas situações de diferentes aberturas com o momento máximo na laje plena.

Com os resultados da análise de todas as lajes com suas diferentes aberturas, será escolhido um caso e será calculado o reforço com CFRP para tal abertura. Para o cálculo do reforço, é necessário o conhecimento da capacidade resistente da peça e, para efeito de estudo, será admitido que a laje está devidamente armada e que essa armadura será igual à calculada no item 5.2 desse trabalho.

Após isso, será apresentado um roteiro de cálculo de cálculo do reforço estrutural utilizando fibra de carbono. O cálculo partirá da consideração da laje como uma viga de altura igual à da laje e de largura igual a 1 metro, como pode ser calculada uma laje maciça convencional. Assim, é esperado, como resultado dos cálculos, a área de fibra necessária para a ampliação da capacidade resistente da peça e, a partir disso a determinação da quantidade de camadas e largura do reforço.

## 4 RESULTADOS

Como resultado do processamento das lajes, a seguir serão exibidos detalhadamente os resultados obtidos para a laje quadrada e para a laje armada em uma direção ( $L_x/L_y = 2,0$ ). Em seguida, serão apresentados os resultados simplificados das demais lajes modeladas.

### 4.1 Lajes extremas

As tabelas a seguir são os resultados obtidos com os modelos das lajes quadrada ( $L_x/L_y = 1,0$ ) e armada em uma direção ( $L_x/L_y = 2,0$ ). Na primeira coluna está apresentado o percentual de abertura em relação a dimensão da laje, onde S/F representa a laje plena (sem furo).

Tabela 2 - Resultado do processamento da laje quadrada ( $L_x/L_y = 1,0$ )

<b>Lx/Ly 1,0</b>	<b>M<sub>máx</sub> (kNm)</b>	<b>M/M<sub>máx</sub></b>
<b>S/F</b>	5,54	1,00
<b>5</b>	5,87	1,06
<b>10</b>	8,14	1,47
<b>15</b>	7,99	1,44
<b>20</b>	7,51	1,35
<b>25</b>	6,85	1,24
<b>30</b>	6,26	1,13
<b>35</b>	5,76	1,04
<b>40</b>	5,33	0,96
<b>45</b>	4,91	0,89
<b>50</b>	4,43	0,80

Fonte: Autor (2017)

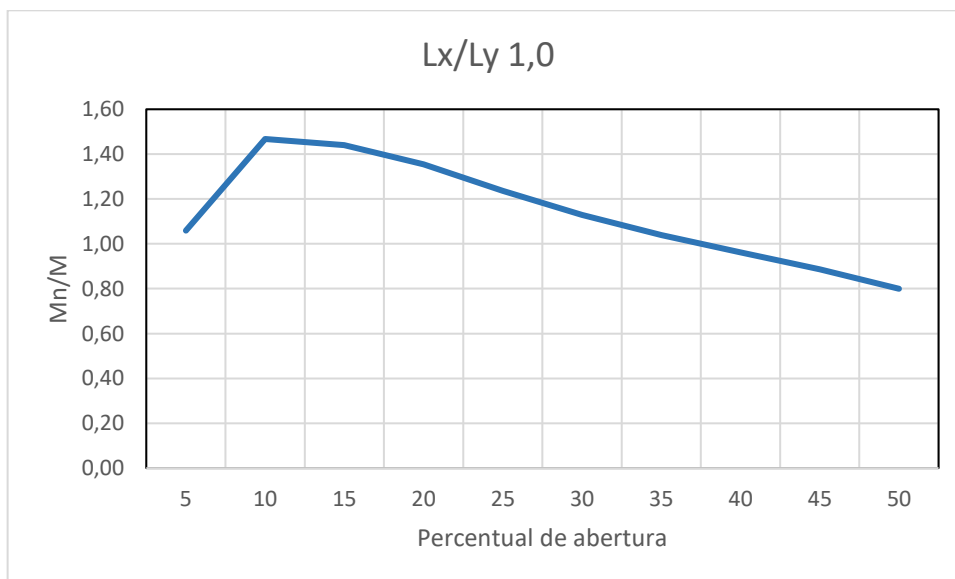
Tabela 3 - Resultado do processamento de uma laje retangular ( $L_x/L_y = 2,0$ )

$L_x/L_y$ 2,0	$M_{m\acute{a}x}$ (kNm)	$M/M_{m\acute{a}x}$
S/F	4,80	1,00
5	8,69	1,81
10	8,88	1,85
15	7,96	1,66
20	7,30	1,52
25	6,85	1,43
30	6,34	1,32
35	5,95	1,24
40	5,45	1,14
45	5,68	1,18
50	5,20	1,08

Fonte: Autor (2017)

A partir desses dados, é criado um gráfico para cada laje. Nos gráficos, o eixo das abcissas representa o percentual dos lados da abertura em relação aos vãos da laje e o eixo das ordenadas representa a relação  $M_n/M$ , onde  $M_n$  é o momento máximo em torno do eixo x para o caso da laje com abertura correspondente a n% dos vãos da laje e M é o momento da laje sem aberturas.

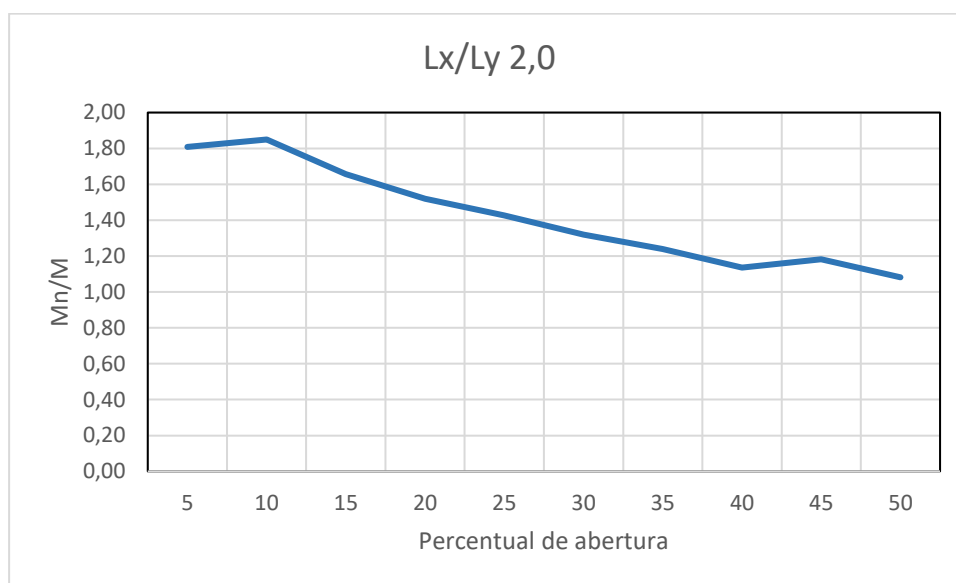
Gráfico 1 - Relação de incremento de momentos para a laje quadrada



Fonte: Autor (2017)

A partir da Tabela 2 é possível notar que o pico de incremento de momento fletor ocorre quando a abertura corresponde a 10% dos vãos para a laje quadrada. Com o auxílio do gráfico, pode-se observar que o momento máximo da laje com abertura se iguala ao momento inicial da laje sem aberturas aproximadamente quando a abertura gira em torno de 37,5% dos vãos da laje. Em seguida, é plotado o gráfico para a laje com relação  $L_x/L_y$  igual a 2,0, seguindo a Tabela 3.

Gráfico 2 - Relação de incremento de momentos para a laje armada em uma direção



Fonte: Autor (2017)

A Tabela 3 apresenta comportamento semelhante à 2, o que é possível perceber ao plotar o Gráfico 2 referente a ela. O pico de incremento de momento fletor na laje ocorre com a abertura correspondente a 10% dos vãos da laje e esse incremento tende a reduzir a medida que as aberturas se tornam maiores. Ainda é possível concluir que, para a laje representada no gráfico acima, em nenhum percentual de abertura analisado o momento máximo com a abertura se iguala ao momento inicial da laje plena.

Apenas o momento na abertura igual a 45% dos vãos se destoa levemente do padrão estabelecido pelos outros momentos, mas ainda assim o resultado da análise se mostrou satisfatório, visto que a modelagem das outras lajes com relação  $L_x/L_y$  variando de 1,2 a 1,8 resultou em gráficos semelhantes aos das lajes já apresentadas.

Para calcular o coeficiente de redução de incremento do momento com o aumento da abertura, faz-se:

$$l_n = \frac{(M/M_{m\acute{a}x})_f - (M/M_{m\acute{a}x})_o}{\%Ab_f - \%Ab_o} \quad (1)$$

Onde:

$l_n$ : Coeficiente de redução do incremento de momento;

$(M/M_{m\acute{a}x})_f$ : Incremento de momento da laje final;

$(M/M_{m\acute{a}x})_o$ : Incremento de momento da laje inicial;

$\%Ab_f$ : Percentual da abertura referente ao  $(M/M_{m\acute{a}x})_f$  considerado;

$\%Ab_o$ : Percentual da abertura referente ao  $(M/M_{m\acute{a}x})_o$  considerado.

Sendo assim, calcula-se, para a laje quadrada ( $l_q$ ):

$$l_q = \frac{(M/M_{m\acute{a}x})_{50\%} - (M/M_{m\acute{a}x})_{10\%}}{\%Ab_{50\%} - \%Ab_{10\%}}$$

$$l_q = \frac{(0,8 - 1,47)}{(50 - 10)}$$

$$l_q = -0,01669$$

Para a laje armada em uma direção ( $l_1$ ) considera-se que o gráfico de incremento de momentos pode ser representado por uma reta desde a abertura de 10% até a final de 50%, resultando no seguinte cálculo:

$$l_1 = \frac{(1,08 - 1,85)}{(50 - 10)}$$

$$l_1 = -0,01920$$

Observando esses coeficientes, conclui-se, inicialmente, que a redução do incremento dos momentos com o aumento das aberturas é mais significativa para a laje com maior grau de retangularidade, ou seja, a diferena entre os vãos da laje pode influenciar nessa maior redução. O estudo das lajes intermediárias no tpico seguinte poderá confirmar as conclusões obtidas dessa análise inicial em relação  influência da retangularidade no incremento de momentos nas bordas das aberturas.

## 4.2 Lajes intermediárias

Com os resultados obtidos da análise das demais lajes, apresentados na Tabela 4 e Tabela 5 com diferentes relações Lx/Ly, foi possível plotar um gráfico para cada laje modelada. Os gráficos individuais serão apresentados em seguida.

Tabela 4 - Resultados para as lajes intermediárias

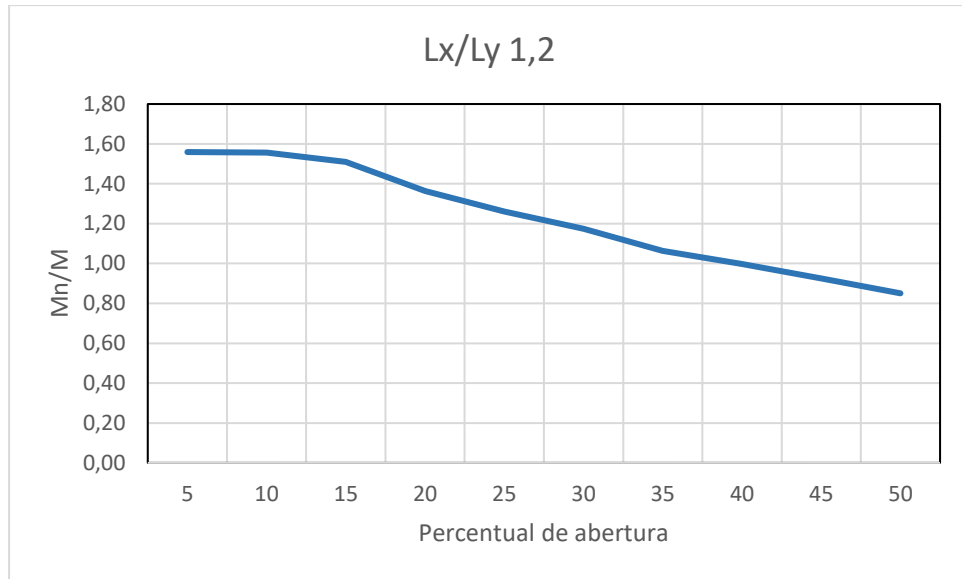
Lx/Ly 1,2	M <sub>máx</sub> (kNm)	M/M <sub>máx</sub>	Lx/Ly 1,4	M <sub>máx</sub> (kNm)	M/M <sub>máx</sub>
S/F	5,64	1,00	S/F	5,47	1,00
5	8,79	1,56	5	8,76	1,60
10	8,77	1,56	10	8,86	1,62
15	8,51	1,51	15	8,36	1,53
20	7,69	1,36	20	7,71	1,41
25	7,11	1,26	25	7,17	1,31
30	6,62	1,17	30	6,64	1,21
35	6,00	1,06	35	6,06	1,11
40	5,62	1,00	40	5,65	1,03
45	5,22	0,93	45	5,32	0,97
50	4,80	0,85	50	4,99	0,91

Fonte: Autor (2017)

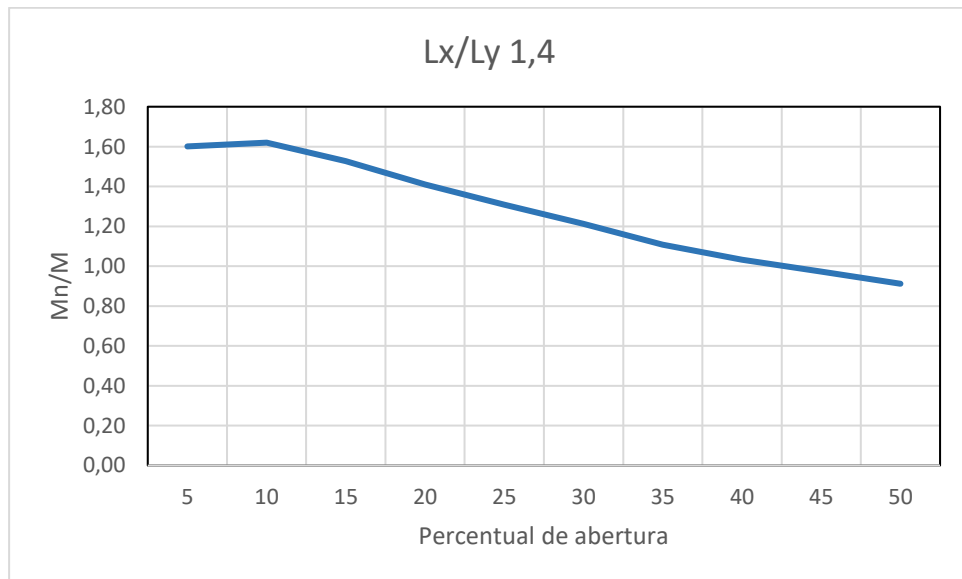
Tabela 5 – Continuação dos resultados para as lajes intermediárias

Lx/Ly 1,6	M <sub>máx</sub> (kNm)	M/M <sub>máx</sub>	Lx/Ly 1,8	M <sub>máx</sub> (kNm)	M/M <sub>máx</sub>
S/F	5,20	1,00	S/F	4,95	1,00
5	8,71	1,68	5	8,69	1,75
10	9,15	1,76	10	9,04	1,83
15	8,24	1,59	15	8,15	1,65
20	7,61	1,46	20	7,50	1,51
25	7,10	1,37	25	6,99	1,41
30	6,58	1,27	30	6,47	1,31
35	6,13	1,18	35	6,05	1,22
40	5,65	1,09	40	5,55	1,12
45	5,26	1,01	45	5,43	1,10
50	5,04	0,97	50	4,96	1,00

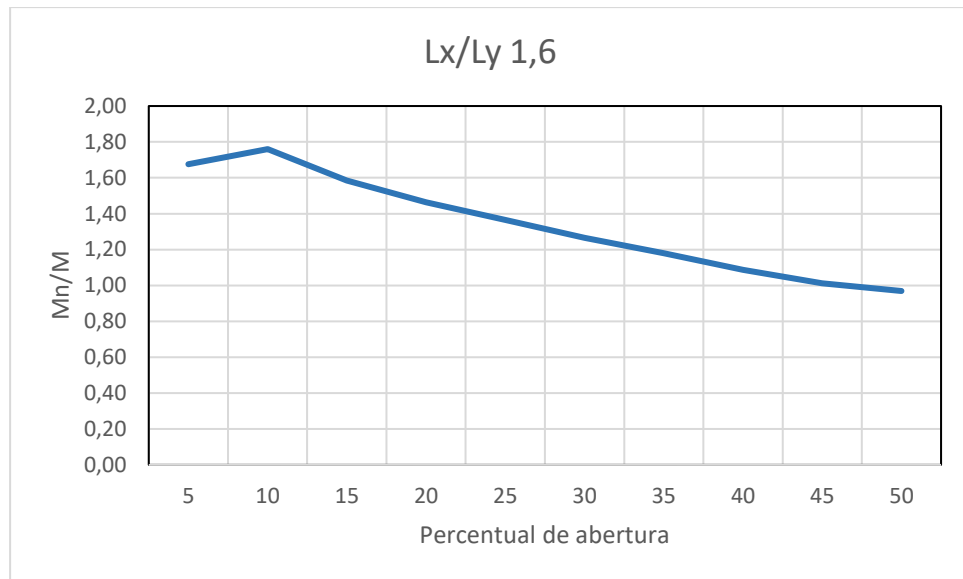
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3 - Relação de incremento de momentos para a laje  $L_x/L_y = 1,2$ 

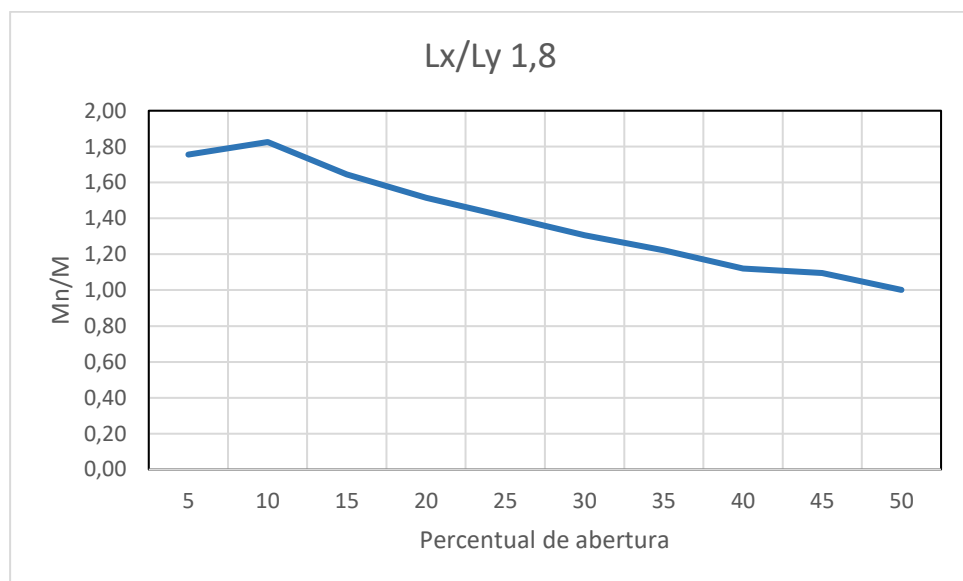
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4 - Relação de incremento de momentos para a laje  $L_x/L_y = 1,4$ 

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 5 - Relação de incremento de momentos para a laje  $L_x/L_y = 1,6$ 

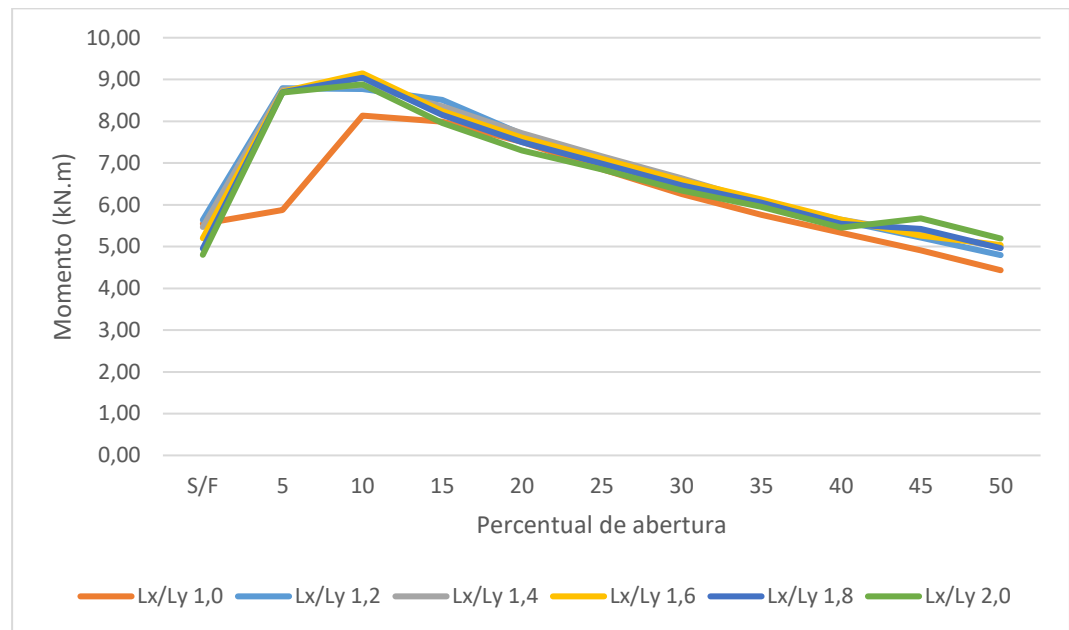
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 6 - Relação de incremento de momentos para a laje  $L_x/L_y = 1,8$ 

Fonte: Autor (2017)

Com todos os gráficos plotados isoladamente, pode-se verificar o comportamento semelhante entre todos eles. Em todos os casos o pico de incremento de momento fletor na laje ocorre na abertura de 10% dos vãos. É possível verificar, também, que o pico de cada gráfico tende a aumentar com a maior relação  $L_x/L_y$ , chegando ao seu valor máximo na laje  $L_x/L_y = 2,0$ , onde  $M_n/M$  é igual a 1,85 na abertura de 10%, ou seja, ocorre um aumento de 85% em relação ao momento fletor sem aberturas na laje. O gráfico dos resultados plotados em conjunto está apresentado no gráfico a seguir.

Gráfico 7 - Resultado final das lajes



Fonte: Autor (2017)

Calculando os coeficientes de redução de incremento e organizando-os juntamente aos calculados no tópico 4.1, temos como resultado a Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Coeficientes de redução do incremento de momento nas lajes

<b>Lx/Ly</b>	<b>Coef.</b>
<b>1,0</b>	-0,01669
<b>1,2</b>	-0,01763
<b>1,4</b>	-0,01769
<b>1,6</b>	-0,01977
<b>1,8</b>	-0,02061
<b>2,0</b>	-0,01920

Fonte: Autor (2017)

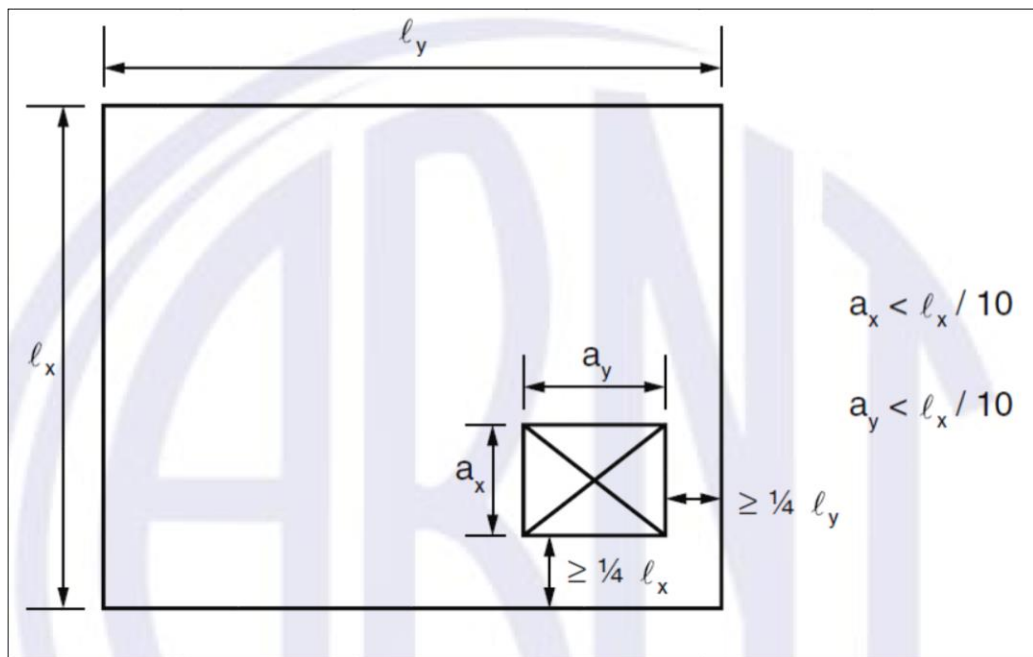
Analisando, por fim, todas as lajes modeladas, verifica-se que o aumento nas solicitações de momento fletor na laje tende a diminuir mais significativamente com o aumento da abertura nas lajes retangulares que na quadrada. Excluindo-se o resultado obtido na laje  $Lx/Ly = 2,0$  pelo fato de que ela foge do padrão estabelecido pelos outros modelos, o coeficiente tende a aumentar, em módulo, conforme aumenta a relação  $Lx/Ly$  das lajes.

### 4.3 Norma Brasileira

A NBR 6118 (2014) no item 13.2.5.2 afirma que é dispensável a verificação de resistência e deformação da laje para os casos em que os seguintes três requisitos são atendidos, são eles:

1. As dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor ( $l_x$ ) (Verificar Figura 8);
2. A distância entre a face de uma abertura e o eixo teórico de apoio da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada;
3. A distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão.

Figura 8 - Dimensões-limites para aberturas de lajes com dispensa de verificação



Fonte: NBR 6118 (2014)

Para as lajes analisadas, o item 2 é atendido para todas as aberturas consideradas, o item 3 é também atendido em todas as modelagens pelo fato de haver apenas uma abertura em todos os casos e, por fim, o item 1 é atendido apenas pela laje quadrada com abertura correspondente a 5 e 10% dos vãos, visto que a abertura não excede o limite da dimensão da abertura estabelecido de 1/10 do menor vão.

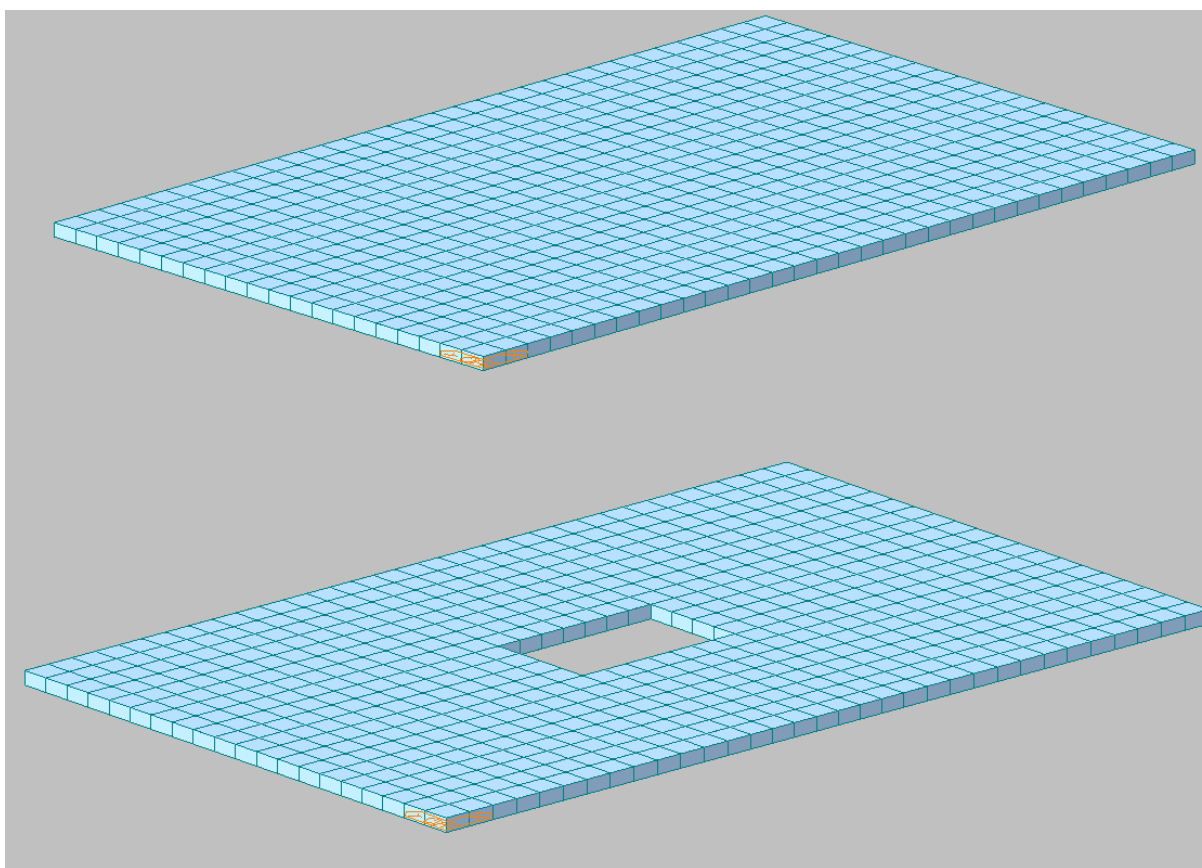
Sabe-se que em todos os casos o pico de incremento de momento fletor em torno do eixo x nas bordas das lajes ocorrem na abertura de 10% dos vãos correspondentes, sendo assim, a dispensa permitida pela norma se mostra questionável prática.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Problematização

Considera-se uma laje de galpão industrial de espessura 12 cm, com dimensões  $L_x$  igual a 8 metros e  $L_y$  igual a 5 metros em que se deseja realizar uma abertura no centro da laje para a instalação de um novo equipamento de grande porte, que necessita de espaço em dois pavimentos. O concreto utilizado na laje possui  $f_{ck}$  igual a 30 MPa, o aço utilizado na armadura é o aço CA-50A e ela apresenta um cobrimento de 3 cm para a superfície de concreto. As dimensões do equipamento indicam a necessidade de uma abertura de dimensões de 160 por 100 cm, o que corresponde a 20% dos vãos da laje considerada.

Figura 9 - Laje plena e com abertura de 20% dos vãos

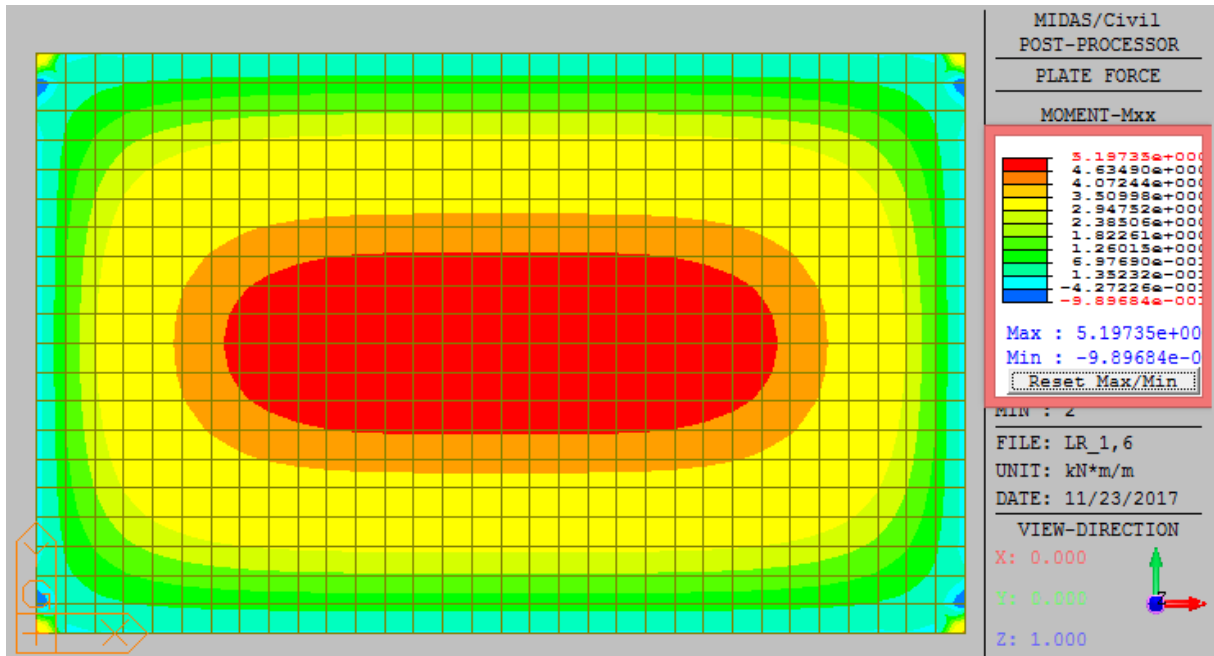


Fonte: Autor (2017)

A análise das lajes, considerando a laje inicial e a laje com a abertura, pelo método dos elementos finitos foi realizada com o software Midas Civil utilizando uma malha de

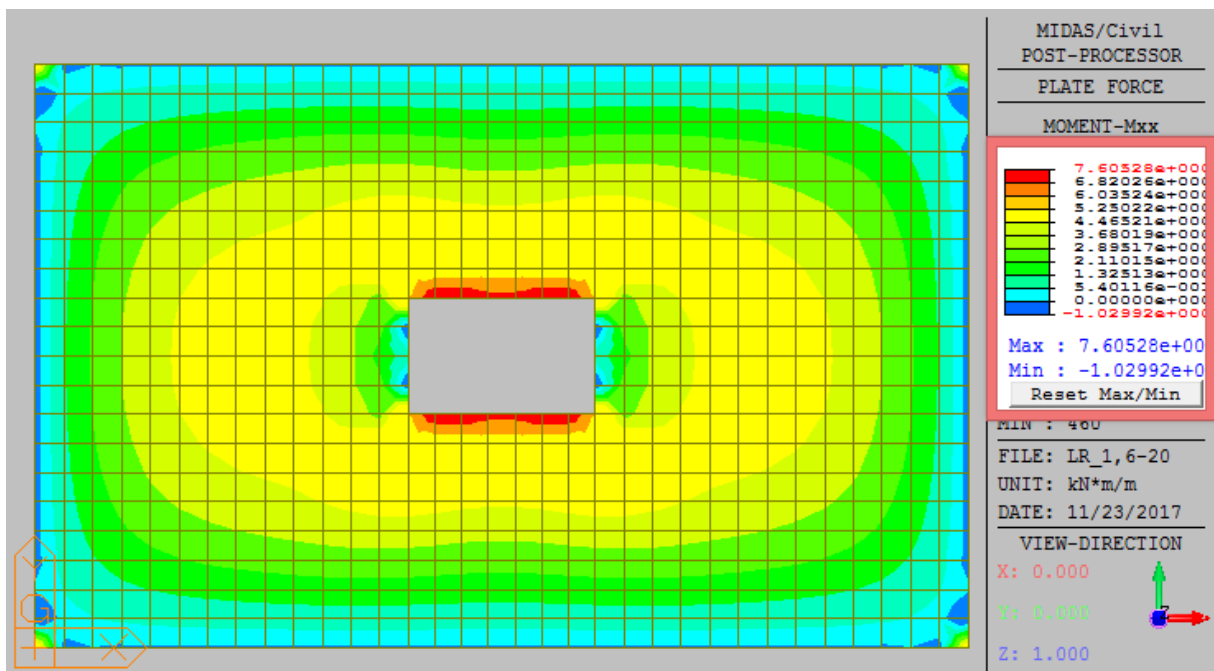
elementos quadrados com 25 cm de lado, a divisão dos elementos de ambos os casos está indicada na Figura 8. Os resultados da análise estão mostrados nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Distribuição de momento fletor em torno de x para a laje plena



Fonte: Autor (2017)

Figura 11 - Distribuição de momento fletor em torno de x para a laje com a abertura



Fonte: Autor (2017)

A análise fornece o momento máximo presente na laje sem aberturas de 5,20 kNm em torno do eixo x. Já para a laje com a abertura, a modelagem indica que o momento máximo na laje será de 7,61 kNm, o que representa um aumento de 46% em relação ao original.

## 5.2 Cálculo da armadura da laje

Para a elaboração do reforço, é necessário o conhecimento da capacidade resistente do elemento inicial e, para isso, será considerado que a laje está armada segundo o seguinte procedimento de cálculo:

- a) Determina-se a solicitação na laje, nesse caso será utilizado o resultado do momento máximo no centro da laje plena fornecido pelo software.

$$M_{Sd} = 1,4 \times 5,20 \therefore M_{Sd} = 7,28 \text{ kNm/m}$$

- b) Considerando a distância entre a face e o centro de gravidade das armaduras igual a 3 cm, como a laje apresenta espessura de 12 cm, temos que a distância entre a fibra mais comprimida de concreto e o centro de gravidade da armadura (d) é de 9 cm.
- c) Fixando-se a altura da laje em 12 cm e considerando uma faixa de 1 metro de laje como uma viga, agora é calculada a armação necessária para uma viga de dimensões 100x12 cm.

Coefficientes da equação do 2º grau utilizada para cálculo da profundidade da linha neutra:

$$A = 0,272 \times f_{cd} \times b_w \quad (2)$$

$$A = 0,272 \times \left( \frac{30000}{1,4} \right) \times 1,0$$

$$A = 5828,57$$

$$B = -0,68 \times f_{cd} \times b_w \times d \quad (3)$$

$$B = -0,68 \times \left( \frac{30000}{1,4} \right) \times 1,0 \times 0,09$$

$$B = -1311,43$$

$$C = M_d \quad (4)$$

$$C = 7,28$$

Onde A, B e C são os coeficientes da seguinte equação do 2º grau:

$$A.X^2 - B.X + C = 0 \quad (5)$$

Resolvendo a equação:

$$5828,57.X^2 - 1311,43.X + 7,28 = 0$$

$$X_1 = 0,2193 \text{ m}$$

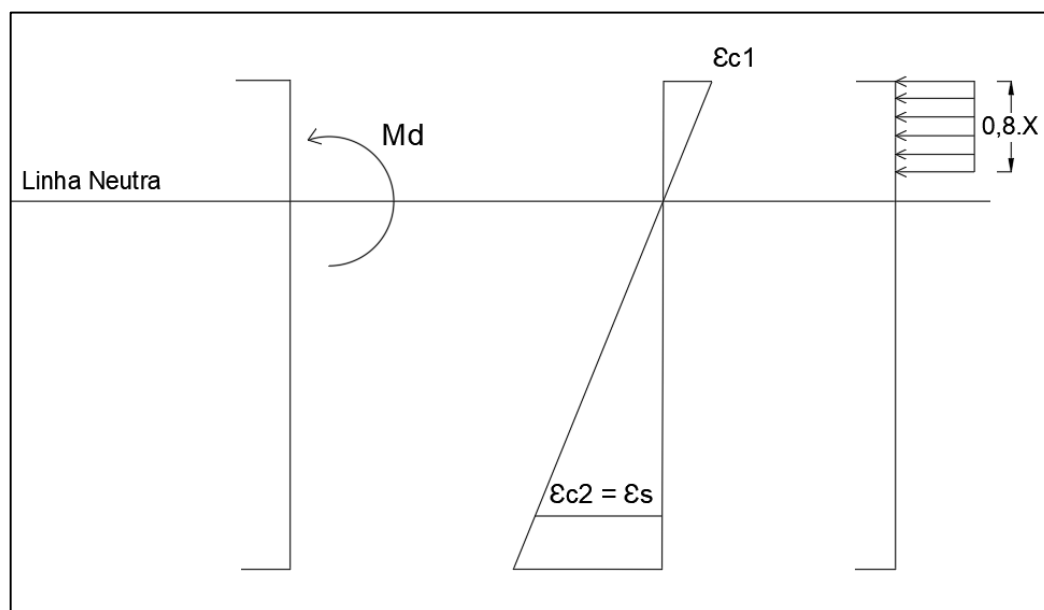
$$X_2 = 0,0057 \text{ m}$$

Como X deve ser menor que a altura h da seção da laje para uma situação normal, considera-se  $X = 0,0057 \text{ m}$ .

$$\text{Assim, } X/d = 0,0633 < 0,45 \rightarrow \text{OK}$$

Agora, calcula-se o braço de alavanca (Z) entre o centro de aplicação da força de tração no aço ( $F_s$ ) desconsiderando a resistência à tração do concreto (estádio II), que é no centro de gravidade das armaduras tracionadas, e a força de compressão no concreto ( $F_c$ ), que pode ser considerado da seguinte maneira, segundo o diagrama simplificado de tensões da seção de uma viga de concreto armado:

Figura 12 – Modelo simplificado de tensões na seção de uma viga de concreto armado submetida a um momento fletor positivo

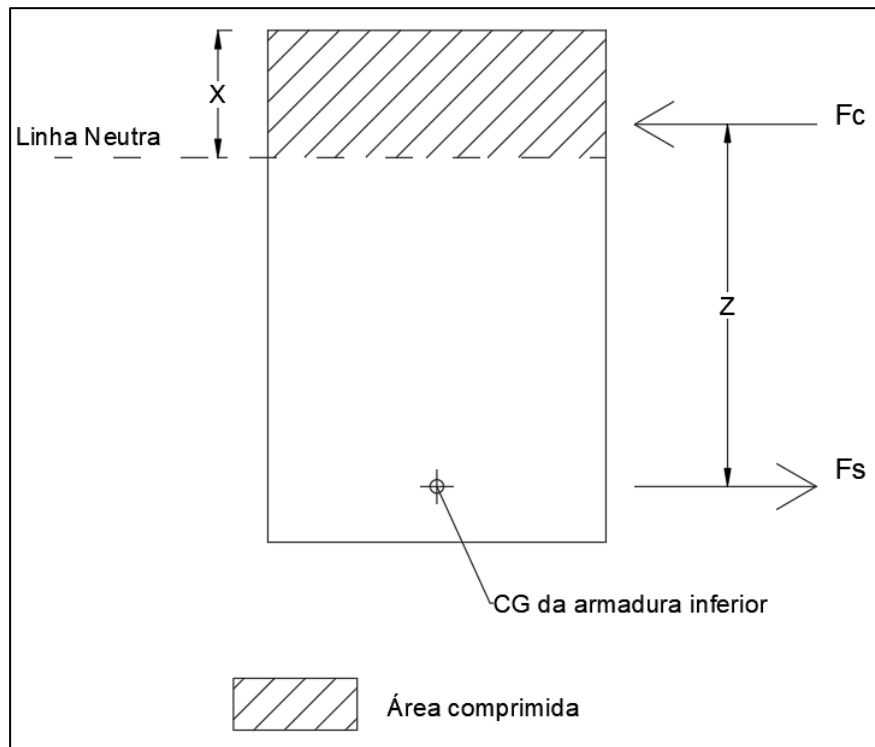


Fonte: Autor (2017)

O modelo acima representado é recomendado pela NBR 6118 (2014) em seu item 17.2.2 assume que a aplicação da compressão na seção de concreto pode ser distribuída uniformemente desde a fibra mais comprimida até uma profundidade de 80% da profundidade da linha neutra, sendo assim, o centro de compressão na seção de concreto armado se localiza  $0,4.X$  abaixo da fibra mais comprimida (para o caso de momento fletor positivo).

Com isso, temos o seguinte esquema final:

Figura 13 - Resultante das forças na seção de uma viga de concreto armado submetida a momento fletor positivo



Fonte: Autor (2017)

Agora é calculado o braço de alavanca ( $Z$ ) entre as forças resultantes no concreto e aço:

$$Z = d - 0,4 \times X \quad (6)$$

$$Z = 0,09 - 0,4 \times 0,0057 \therefore Z = 0,0877 \text{ m}$$

Por fim, é calculada a armadura da laje:

$$A_s = \frac{M_d}{f_s \times Z} \quad (7)$$

$$A_s = \frac{7,28}{43,5 \times 0,0877} \therefore A_s = 1,91 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Comparando com a armadura mínima:

$$A_{s,\text{mín}} = 0,15\% \cdot A_c \quad (8)$$

$$A_{s,\text{mín}} = 0,15\% \times 100 \times 12 \therefore A_{s,\text{mín}} = 1,8 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Como  $A_s > A_{s,\text{mín}}$ , então  $A_s = 1,91 \text{ cm}^2/\text{m}$ .

A laje armada com  $1,91 \text{ cm}^2/\text{m}$  pode ser representada por:

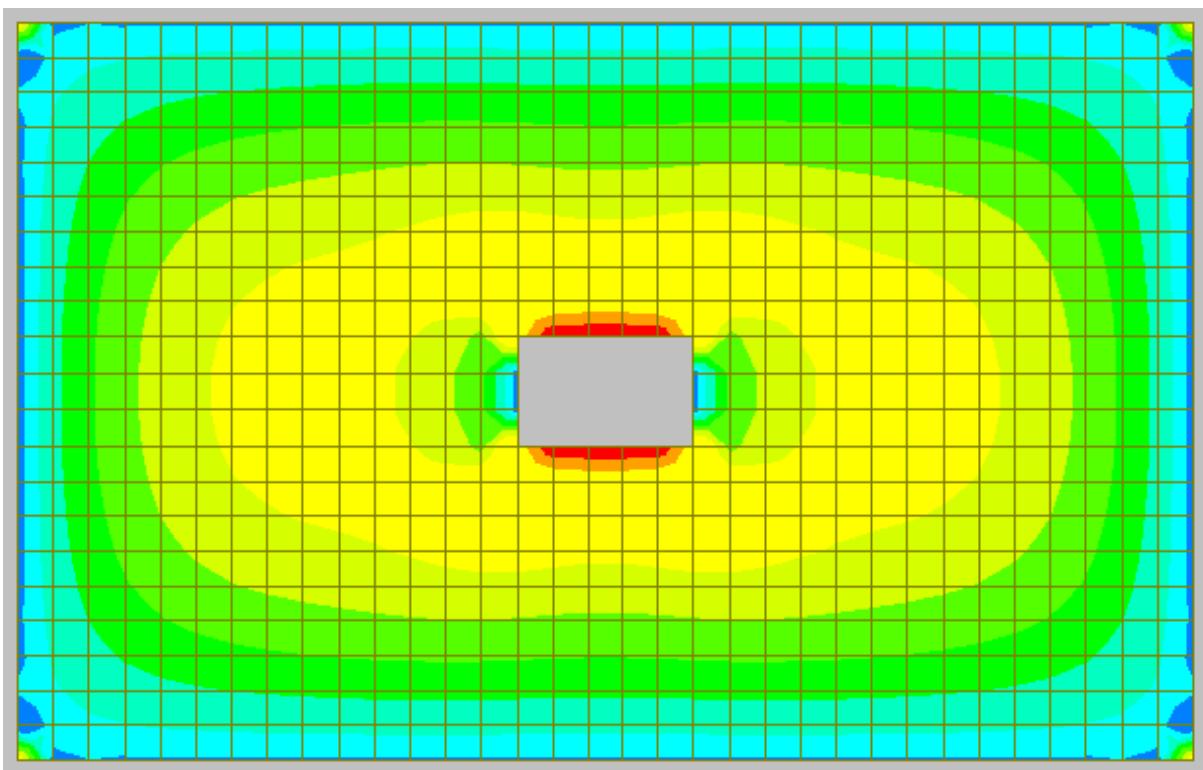
$$n = \frac{A_s}{A_\phi} \quad (9)$$

$$n = \frac{1,91}{0,5} \therefore n = 3,8\phi 8 \text{ por metro} \rightarrow \phi 8c/25$$

### 5.3 Cálculo do reforço com CFRP

O reforço com laminado de fibra de carbono, nesse caso, deve ser aplicado na face inferior da laje a ser reforçada, como indicado no item 5.4 deste trabalho, e o cálculo será feito considerando que a fibra inferior do concreto da laje será aderida ao reforço de modo que eles apresentem mesma deformação, que é a premissa básica para a utilização dessa técnica de reforço. A área a ser reforçada será a que rodeia a abertura, pois essa é a área crítica de incremento de momento fletor, como indica a Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Padrão de surgimento de momentos adicionais em torno do eixo x em aberturas em lajes



Fonte: Autor (2017)

No cálculo do reforço pode ser desconsiderado o peso do reforço em si, visto que, como será apresentado posteriormente, ele possui um peso mínimo comparado ao da estrutura em si, chegando até 300 g/m<sup>2</sup> de reforço do tipo CF-130.

### 5.3.1 Método 1

Antes do procedimento de cálculo, é necessário se verificar a capacidade resistente ao momento fletor de uma peça que não possui armadura de compressão (caso geral de lajes) e reforçada com fibra de carbono, para isso, utiliza-se a seguinte equação:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot X}{2} \right) + \Psi_f \cdot A_f \cdot f_f \cdot \left( d_f - \frac{\beta_1 \cdot X}{2} \right) \quad (10)$$

Onde:

$M_{Rd}$ : Momento fletor resistente de cálculo da peça.

$A_s$ : Área de aço na armadura positiva da laje.

$f_s$ : Tensão de escoamento de cálculo do aço CA-50A.

$d$ : Distância entre a fibra mais comprimida de concreto ao centro de gravidade das armaduras de tração.

$\beta_1$ : Coeficiente de simplificação das tensões presente no item 17.2.2 da NBR 6118 (2014). Para o caso de concreto de classe até C50:  $\beta_1 = 0,8$ .

$X$ : Distância da fibra mais comprimida de concreto à linha neutra da seção.

$\Psi_f$ : Coeficiente adicional de redução da resistência do elemento de fibra de carbono, no valor de 0,85, que foi apresentado no item 2.4.7.

$A_f$ : Área da seção transversal do reforço aderido externamente ao concreto.

$f_f$ : Tensão de ruptura do laminado de fibra de carbono.

$d_f$ : Distância da fibra mais comprimida de concreto ao centro de gravidade do reforço aderido externamente ao concreto.

A equação 10 desconsidera as deformações existentes da peça antes da aplicação da fibra, ou seja, para sua eficácia, é necessário o re-escoramento da estrutura para a aplicação da fibra, de modo que, no momento da aplicação do reforço, a estrutura não apresente uma flecha.

É conferida, inicialmente, a capacidade resistente da laje armada com 1,91 cm<sup>2</sup>/m considerando uma faixa de 1,0 m, substituindo os valores na Equação 10.

$$M_{Rd1} = (1,91 \times 10^{-4}) \cdot \frac{500000}{1,15} \cdot \left( 0,09 - \frac{0,8 \times 0,0057}{2} \right)$$

$$M_{Rd1} = 7,28 \text{ kNm}$$

O valor corresponde ao momento solicitante calculado anteriormente, confirmando a aplicabilidade da equação 10.

É necessário que a laje seja capaz de resistir, no mínimo, ao esforço característico de 7,61 kNm fornecido pela modelagem com elementos finitos, então é necessário que a laje apresente capacidade resistente de cálculo mínima de:

$$M_{Rd} = 7,61 \times 1,4 \therefore M_{Rd} = 10,65 \text{ kNm}$$

Para seguir com o dimensionamento, o próximo passo é a escolha da resistência da fibra que será considerada para o reforço, então parte-se para algumas opções disponíveis no mercado atual pelo sistema MBrace®, que serão disponibilizadas na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 - Características físicas e mecânicas do CFRP

Características do Produto	CF - 130	CF - 160
<b>Apresentação em Rolos</b>	0,60m x 81,00m	0,50m x 50,00m
<b>Área</b>	48,60 m <sup>2</sup>	25,00 m <sup>2</sup>
<b>Peso por área</b>	300 g/m <sup>2</sup>	600 g/m <sup>2</sup>
<b>Espessura nominal</b>	0,165 mm/lâmina	0,330 mm/lâmina
<b>Resistência máxima à tração</b>	3800 MPa	3800 MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	227 GPa	227 GPa
<b>Resistência máxima na largura</b>	0,625 kN/mm/lâmina	1,250 kN/mm/lâmina
<b>Deformação máxima</b>	1,67%	1,67%

Fonte: ABECE (2006) – Disponível em <http://www.abece.com.br/e-ArtigosABECE007.pdf>

Considerando as resistências máximas à tração de ambos os produtos, temos que:

$$f_f = 3800 \text{ MPa}$$

Substituindo os valores na Equação 10:

$$10,65 = 1,91 \cdot \frac{500}{1,15} \cdot \left( 0,09 - \frac{0,8 \times 0,0057}{2} \right) + 0,85 \cdot A_f \cdot 3800 \cdot \left( 0,12 - \frac{0,8 \times 0,0057}{2} \right)$$

$$A_f = 8,85 \text{ mm}^2$$

Agora para calcular a largura do laminado para a aplicação considerando o número de camadas, pode-se utilizar a seguinte formulação básica:

$$A_f = t \times l \quad (11)$$

Onde:

$A_f$ : Área do reforço com CFRP;

$t$ : Espessura nominal do reforço;

$l$ : Largura do reforço (medida no sentido perpendicular às fibras).

Para a consideração do número de camadas de reforço necessárias, considera-se a área necessária e a largura calculada. Para utilizar apenas uma camada, considera-se que a área integral vai ser atendida por uma única camada com largura  $l$ , já para utilizar duas camadas, considera-se que a área a ser atendida por cada camada é igual à metade da área total necessária e assim sucessivamente. Recomenda-se a utilização de uma largura máxima de 60 cm para o CF-130 e de 50 cm para o CF-160 pois, respectivamente, eles são fornecidos em rolos com 50 e 60 cm de largura. Para o caso de outros fornecedores, considera-se a largura nominal dos rolos da mesma forma.

Seguindo com o dimensionamento, para o CF-130 utiliza-se a espessura nominal de 0,165 mm na equação, resultando em:

$$8,85 = 0,165 \times l \therefore l = 53,64 \text{ mm} \cong 5,5 \text{ cm}$$

Assim, a largura do reforço necessária é de somente 5,5 cm com apenas uma camada com fibras de 0,165 mm de espessura.

### 5.3.2 Método 2

Esse método, diferente do anterior, considera as deformações pré-existent na peça a ser reforçada, ou seja, deve fornecer valores mais conservadores em área necessária de reforço.

Inicialmente, supõe-se que a peça está submetida a um momento característico de 2,6 kNm, o que corresponde a 50% do momento limite de projeto inicial, pois considera-se que

metade da carga projetada seria de sobrecarga na estrutura e para a execução do reforço a estrutura não apresenta sobrecarga. Para isso, é considerado que a laje está do estágio II, ou seja, a força na armadura é igual à resultante da tração no concreto no estágio I. Para descobrirmos a força na armadura e a sua deformação, é necessário calcular a posição da linha neutra na peça com o momento citado, para isso, utiliza-se a seguinte equação do 2º grau:

$$b_w \cdot X_{II}^2 + 2 \cdot \frac{E_s}{E_{cs}} \cdot A_s \cdot X_{II} - 2 \cdot \frac{E_s}{E_{cs}} \cdot A_s \cdot d = 0 \quad (12)$$

Onde:

$X_{II}$ : Profundidade da linha neutra no estágio II;

$E_s$ : Módulo de elasticidade do aço;

$E_{cs}$ : Módulo de elasticidade secante do concreto;

Substituindo os valores na equação 12, temos:

$$100 \cdot X_{II}^2 + 2 \cdot \frac{210 \text{ GPa}}{27 \text{ GPa}} \cdot 1,91 \cdot X_{II} - 2 \cdot \frac{210 \text{ GPa}}{27 \text{ GPa}} \cdot 1,91 \cdot 9 = 0$$

Considerando somente o valor positivo de  $X_{II}$ , temos:

$$X_{II} = 1,49 \text{ cm}$$

Após calcular a profundidade da linha neutra no estágio II da seção 100 cm x 12 cm da laje, calcula-se o momento de inércia no estágio II da seção com a seguinte equação:

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + \frac{E_s}{E_{cs}} \cdot A_s \cdot (d - X_{II})^2 \quad (13)$$

Substituindo os valores na equação 13, o momento de inércia no estágio II da seção é igual a:

$$I_{II} = \frac{100 \cdot 1,49^3}{3} + \frac{210}{27} \cdot 1,91 \cdot (9 - 1,49)^2 \therefore I_{II} = 948,1178 \text{ cm}^4 \cong 9,48 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Com os valores da profundidade da linha neutra e momento de inércia no estágio II, agora calcula-se a tensão no aço utilizando a seguinte formulação:

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_{cs}} \cdot M_{d0} \cdot \frac{(d - X_{II})}{I_{II}} \quad (14)$$

Substituindo os valores, a tensão no aço é igual a:

$$\sigma_s = \frac{210}{27} \cdot (2,6 \times 1,4) \cdot \frac{(0,09 - 0,0149)}{9,48 \times 10^{-6}} \therefore \sigma_s = 147790 \text{ KPa} \cong 147,79 \text{ MPa}$$

Agora dividindo a tensão no aço pelo seu módulo de elasticidade, obtém-se a deformação do aço antes do reforço:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{147,79}{210} \therefore \varepsilon_s = 0,7 \text{ mm/m}$$

Nesse momento pode ser feita uma semelhança de triângulos, de modo que seja possível obter a deformação na face inferior da laje antes da aplicação do reforço:

$$\frac{\varepsilon_s}{(d - X)} = \frac{\varepsilon_{fi}}{(d - X + c)} \quad (15)$$

Onde:

$c$ : Cobrimento da armadura passiva;

$\varepsilon_{fi}$ : Deformação da face inferior de concreto.

Substituindo os valores obtidos anteriormente na equação 15, temos:

$$\frac{0,7}{(9 - 1,49)} = \frac{\varepsilon_{fII}}{(9 - 1,49 + 3)} \therefore \varepsilon_{fII} = 0,99 \text{ mm/m}$$

Com a deformação da face inferior da laje considerando sua carga de utilização igual a metade da qual foi projetada (Momento resistente de cálculo igual a 3,36 kNm), a face inferior do concreto da laje apresentará deformação de 0,99 mm/m.

Com o  $X/d = 0,0633$  calculado anteriormente no dimensionamento da laje, a seção tende a romper no domínio 2 de estado limite último, ou seja, ruptura por flexão com o escoamento do aço sem a ruptura por compressão do concreto. Sabendo disso, sabe-se que o aço CA-50A rompe com uma deformação de 10 mm/m, sendo assim, pode-se calcular a deformação do concreto no momento em que o aço atingir sua deformação de ruptura utilizando a equação 15 novamente, modificando a profundidade da linha neutra para seu valor no Estado Limite Último calculado anteriormente:

$$\frac{10}{(9 - 0,57)} = \frac{\varepsilon_{fELU}}{(9 - 0,57 + 3)} \therefore \varepsilon_{fELU} = 13,56 \text{ mm/m}$$

Com as deformações na superfície inferior da laje com a carga considerada normal de utilização e na ruptura, é verificado o descolamento do reforço com fibra de carbono. Para o reforço com fibra de carbono do tipo CF-130, considera-se uma deformação máxima de 15,03 mm/m (90% da deformação limite de ruptura igual a 16,7 mm/m) para prevenir o descolamento, sendo assim, se a diferença entre as deformações for maior que a deformação máxima do reforço, a ruptura será do tipo frágil com descolamento do reforço, o que não é desejável para o dimensionamento. Verificando:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{fELU} - \varepsilon_{fII} = 13,56 - 0,99 \therefore \Delta\varepsilon = 12,57 \text{ mm/m}$$

Como  $12,57 \text{ mm/m} < 15,03 \text{ mm/m}$ , então a ruptura acontecerá pelo escoamento do aço antes do descolamento da fibra.

Sabe-se que a estrutura foi projetada para resistir a  $M_{Rd0} = 7,29 \text{ kNm}$  e agora deverá resistir a  $M_{Rd} = 10,65 \text{ kNm}$ . A diferença entre esses momentos deve ser resistida pela fibra de carbono de reforço que será utilizada, sendo assim, utilizando a reação da fibra e seu braço de alavanca em relação à linha neutra na ruptura, pode-se calcular a área necessária de reforço:

$$M_f = R_f \times z_f \tag{16}$$

Onde:

$$R_f = E_f \times \varepsilon_f \times A_f \tag{17}$$

$$z_f = d - X + c \tag{18}$$

Trabalhando nas equações:

$$M_f = M_{Rd} - M_{Rd0} = 10,65 - 7,29 \therefore M_f = 3,36 \text{ kNm}$$

$$R_f = 227 \times 10^6 \times 12,57 \times 10^{-3} \times A_f = 2853390 \times A_f$$

$$z_f = 9 - 0,57 + 3 \therefore z_f = 11,43 \text{ cm}$$

$$M_f = R_f \times z_f \therefore 3,36 = 2853390 \times A_f \times 0,1143 \therefore A_f = 1,225 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,1 \text{ cm}^2$$

Com a área necessária de 0,1 cm<sup>2</sup> de fibra, utilizando a equação 11 pode-se calcular, finalmente, a largura do reforço.

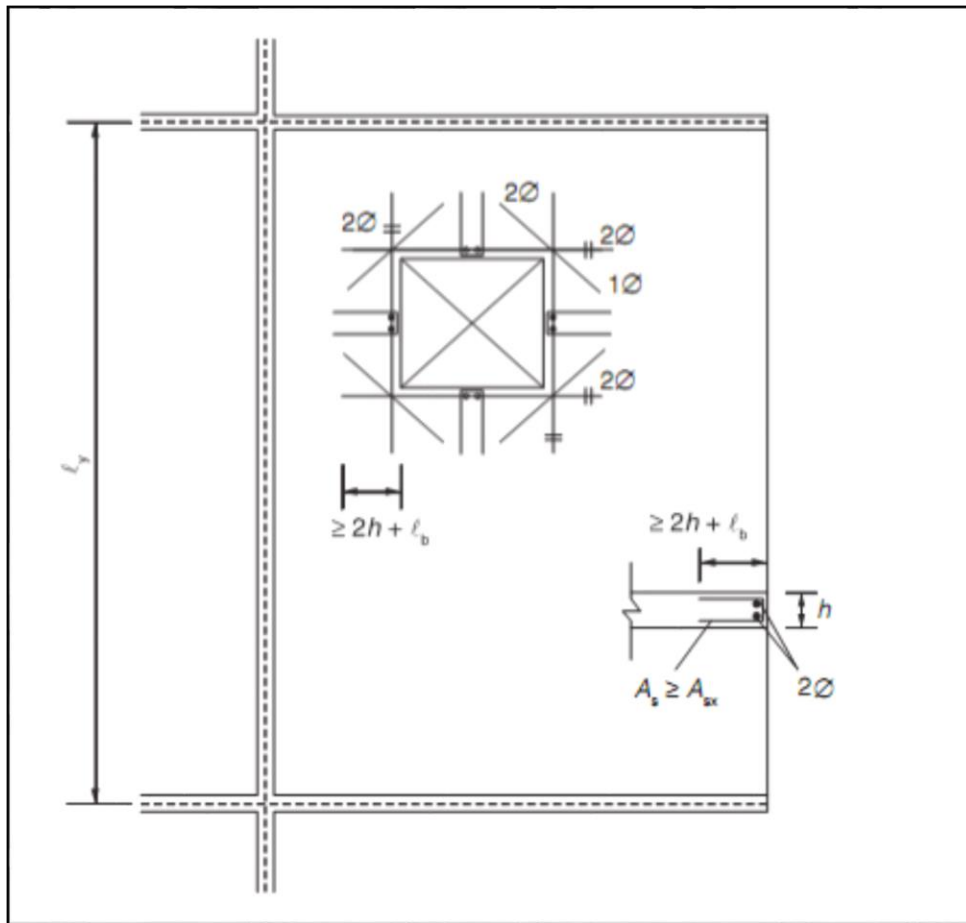
$$0,1 = 0,0165 \times l \therefore l = 6,1 \text{ cm}$$

Deve-se ter em vista que a nova reação do reforço resultará em um desequilíbrio das forças de reação originais na seção do elemento, isso faz com que seja necessário o cálculo da nova profundidade da linha neutra, utilizando planilhas de cálculo, é possível determinar que a nova linha neutra apresentará uma profundidade de  $X = 0,77$ . Refazendo os cálculos a partir da verificação do descolamento com a equação 15, verifica-se que o  $\Delta\varepsilon$  para a fibra com 0,1 cm<sup>2</sup> de área resulta em 12,66 mm/m, ou seja, ainda dentro do limite de 15,03 mm/m estabelecido anteriormente. Calculando o momento gerado pela reação da fibra aderida ao concreto utilizando a nova profundidade da linha neutra, observa-se que ela gera um momento de 10,58 kNm, momento menor que o calculado anteriormente para a antiga linha neutra. O processo é iterativo, de modo que é possível obter uma área de fibra adequada utilizando as equações já apresentadas. Como resultado final, pode-se admitir que a área de 0,1 cm<sup>2</sup> de fibra atende ao momento de cálculo de 10,65 kNm, visto que representa apenas uma diferença de menos de 1% em relação ao 10,58 kNm calculados.

#### 5.4 Aplicação do reforço

A NBR 6118 (2014) indica, no item 20.2, o posicionamento do reforço para o caso de bordas livres e aberturas em lajes. As bordas livres e as faces das lajes maciças junto as aberturas devem ser protegidas por armaduras transversais e longitudinais, alguns detalhes sugeridos pela norma estão disponibilizados na Figura 15.

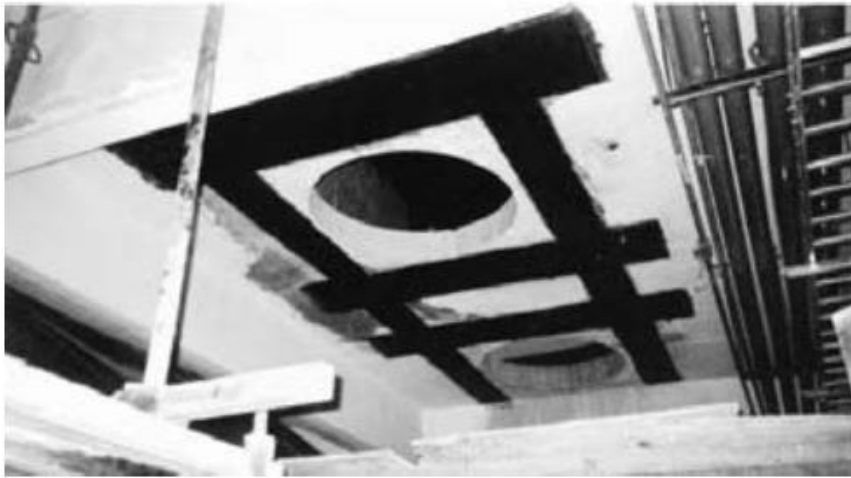
Figura 15 - Posicionamento do reforço em bordas livres e aberturas em lajes maciças



Fonte: NBR 6118 (2014)

Como o reforço, neste caso, será feito não com barras de aço, mas com fibra de carbono, as fibras devem ser dispostas de maneira semelhante, de modo que sejam capazes de absorver os esforços gerados pela abertura. Um exemplo de aplicação da fibra de carbono em abertura de laje está na Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de reforço para abertura em laje



Fonte: Machado (2012)

Considerando os quatro bordos que serão reforçados de forma semelhante à apresentada na figura acima, pode-se calcular a área aproximada em planta que será necessária para atender a abertura.

$$A_{f,total} = 2 \times (l \times a_x) + 2 \times (l \times a_y) \quad (19)$$

Onde:

$a_x$ : Comprimento da abertura no eixo x;

$a_y$ : Comprimento da abertura no eixo y.

Substituindo os valores resultantes das duas metodologias de cálculo, temos:

Método 1:

$$A_{f,total} = 2 \times (5,5 \times 160) + 2 \times (5,5 \times 100) \therefore A_{f,total} = 2860 \text{ cm}^2 = 0,286 \text{ m}^2$$

Método 2:

$$A_{f,total} = 2 \times (6,1 \times 160) + 2 \times (6,1 \times 100) \therefore A_{f,total} = 3172 \text{ cm}^2 = 0,317 \text{ m}^2$$

A diferença, por fim, entre os métodos é de 10,9% do método 2 em relação ao 1.

## **6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 Conclusão**

A aplicação da fibra para o caso de reforço para aberturas em lajes se mostrou numericamente viável considerando que a largura necessária de fibra para que a área seja atendida em apenas uma camada de reforço foi de apenas 6,1 cm para cada lado da abertura, de modo que a área em planta de aplicação do reforço foi de 0,317 m<sup>2</sup>. Considerando as premissas do cálculo de que a resina saturante seja capaz de transmitir todas as deformações da superfície de contato concreto-reforço, e desconsiderando a ancoragem necessária do reforço, o resultado foi satisfatório.

Na análise das aberturas das lajes, o acréscimo de momentos que ocorrem nas aberturas correspondentes a 10% dos vãos das lajes, em contraste com as recomendações da NBR 6118 (2014) para dispensa de verificações de esforços, foi de certa forma inesperado.

Como a o cálculo desenvolvido através do estudo de caso foi realizado através de dois métodos com considerações iniciais diferentes, foi possível verificar na prática a influência da deformação inicial da peça na área necessária de reforço para absorver os esforços extras na laje. A diferença de 10,9% de área necessária de fibra entre os métodos é relativamente alta levando em consideração que os esforços que a estrutura no geral estará submetida serão os mesmos.

### **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como recomendação para trabalhos futuros, pode-se analisar lajes com aberturas de diferentes dimensões e com carga igualmente distribuída, assim como foi analisado nesse, mas com diferentes condições de apoio, ou seja, com um, dois, três ou quatro bordos engastados. Nesses estudos pode ser observado o aumento no momento fletor nos bordos das aberturas e verificado se existe uma expressão analítica que represente fielmente o aumento baseado nas dimensões das lajes e das aberturas. Além disso, pode-se verificar a mudança no momento nos bordos das aberturas com casos em que surgem cargas distribuídas linearmente nesses bordos, a influência de cargas pontuais na laje e a geração de momento extra no entorno das aberturas. As aberturas também podem ser necessárias nas bordas da laje, pode ser verificada também a ocorrência de momentos para esses casos.

## REFERÊNCIAS

- ADORNO, Felipe Vieira; DIAS, Frederico Oliveira; SILVEIRA, João Clímaco de Oliveira. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- ALMEIDA, Tatiana Gesteira Martins de. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Fundamentos do concreto armado**: Notas de aula da disciplina de Estruturas IV – Concreto armado, Campinas, 2002, 12 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 440.2R-02**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118 2014**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Histórico e principais elementos estruturais do concreto armado**: Notas de aula da disciplina de Sistemas Estruturais I, Bauru, 2006, 15p.
- KLEIN, Tana Renck. **Reforço Estrutural em Concreto Armado**. Disponível em <<https://www.ufrgs.br/eso/content/?p=1141>>. Acesso em 10/09/2017.
- MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 1 ed. VIAPOL. São Paulo, 2012.
- MACHADO, Ari de Paula; MACHADO, Bruno Alberto. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP**: Teoria e Prática. 1 ed. PINI. São Paulo, 2015, 556 p.
- MACHADO, Ari de Paula. Revisita Técnica, Edição 125. **Reforço de Estruturas de Concreto com fibras de carbono**. <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-1.aspx>>. Acesso em 10/09/2017.
- SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1998.
- STIN ENGINEERING. **Utilização de Polímeros Reforçados com Fibra na Construção de Estruturas**. Disponível em <<https://www.engenhariacivil.com/polimeros-reforcados-fibras-construcao-estruturas>>. Acesso em 10 junho 2017.
- Techniques Soluções em Engenharia. **Recuperação, reforço e proteção de estruturas**. <<http://techniques.com.br/>>. Acesso em 10/09/2017.
- TEJEDOR, Cristina Mayán. **Patologias, recuperação e reforço com protensão externa em estruturas de pontes**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

VIEIRA, Mylene de Melo. **Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono**. 2014. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2014.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para reforço de elementos estruturais**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2015