



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MANUEL GONÇALVES DE ABREU

**COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE REFORÇOS ESTRUTURAIS
APLICADOS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO**

FORTALEZA

2021

MANUEL GONÇALVES DE ABREU

**COMPARATIVO ENTRE METODOS DE REFORÇO ESTRUTURAIS
APLICADOS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães
Feitosa Lima.

FORTALEZA

2021

Folha destinada à inclusão da **Ficha Catalográfica** a ser solicitada à Biblioteca da FAS e posteriormente impressa no verso da Folha de Rosto (folha anterior).

Espaço destinado à elaboração da ficha catalográfica sob
responsabilidade da Faculdade Ari de Sá.

MANUEL GONÇALVES DE ABREU

**COMPARATIVOS ENTRE METODOS DE REFORÇOS ESTRUTURAIS
APLICADOS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães
Feitosa Lima

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa Lima (Orientador)
Faculdade Ari de Sá

Prof^a. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

Prof. Me. Francisco Rosendo Sobrinho
Faculdade Unichristus

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela presença irrefutável em minha vida.

Aos meus pais pelo exemplo de determinação na vida e fé inabalável. E a toda minha família por entender minha ausência junto a todos.

A todos os professores que de forma grandiosa participaram desta caminhada com suas lições que marcaram definitivamente minha vida.

Agradeço ao Professor e Mestre Esio Magalhães Feitosa Lima, pela sua grandiosa participação no decorrer deste projeto de estudo, e principalmente por aceitar ser meu orientador deste trabalho de pesquisa.

RESUMO

Como toda estrutura de concreto armado tem seu limite de vida útil, isto implica no surgimento de manifestações patológicas ao final deste limite, e até mesmo em construções recentes. Mesmo com o avanço tecnológico dos materiais da construção civil, o surgimento destas patologias e as mudanças de uso destas estruturas, leva a aplicação de reforços a fim de garantir o uso com a devida segurança ao usuário. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de aplicações de reforços estruturais em edificações, direcionadas as lajes de concreto armado, através de diferentes técnicas de reforços disponíveis no mercado da construção civil. Nele é apresentada técnicas de reforços como a adição de armaduras, reforços através de chapas de aço e perfis metálicos, além da aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Embora estes procedimentos apresentados sejam aplicados em lajes, os mesmos poderão ser usados em qualquer estrutura de concreto armado a ser reforçada. As aplicações destes métodos em lajes, ou em qualquer outra estrutura de concreto armado deverá ser condicionada a geometria do local e o tipo de reforço. A escolha da técnica de reforço apresentada levará em conta a arquitetura do local, junto ao grau do dano exposto na mesma, com objetivos de evitar grandes alterações da arquitetura e gastos desnecessários de materiais, analisando as vantagens e desvantagens das técnicas estudadas. Todas as técnicas garantem o aumento da resistência da estrutura. No entanto, a aplicação do PRFC, além de garantir uma elevada resistência, conta com a praticidade e rapidez da execução, sem alteração na arquitetura da estrutura. Ressalta-se a importância de todos os trabalhos de reforços de estruturas, estando estes sob uma fiscalização eficiente e possuindo um total controle de qualidade dos materiais e de todas as atividades envolvidas no processo.

Palavras-chave: Técnicas de reforço estrutural. Reforço com fibras de carbono. Chapas metálicas. Perfis metálicos.

ABSTRACT

As every reinforced concrete structure has its useful life limit, this implies the appearance of pathological manifestations at the end of this limit, and even in recent constructions. Even with the technological advance of civil construction materials, the emergence of these pathologies and the changes in the use of these structures, leads us to apply reinforcement in order to guarantee the use with due safety to the user. This work presents a bibliographical review on the techniques of application of structural reinforcements in buildings, directed to reinforced concrete slabs, through different recovery techniques available in the civil construction Market. Reinforcement techniques will be presented, such as addition of reinforcement, reinforcement through steel sheets and metal profiles, in addition to the application of polymers reinforced with carbon fibers (CFRP). Although these procedures presented are applied to slabs, they can be used in any reinforced concrete structure to be reinforced. The application of these methods in slabs, or in any other reinforced concrete structure, must be conditioned by the location's geometry and the type of reinforcement. The choice of reinforcement technique presented will take into account the architecture of the place, together with the degree of damage exposed in it, with the aim of avoiding major architectural changes and unnecessary material expenses, analyzing the advantages and disadvantages of the studied techniques. All techniques guarantee the increased strength of the structure. However, the application of the CFRP, in addition to ensuring high resistance, counts on the practicality and speed of execution, without changing the architecture of the structure. It emphasizes the importance of all structural reinforcement works, which are under efficient supervision and have a total quality control of materials and all activities involved in the process.

Keywords: Structural reinforcement techniques. Reinforced with carbon fibers. Metallic sheets. Metal profiles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de reforço por Introdução de novas armaduras em escavação feita na secção existente	18
Figura 2 - Corte AA escavação para Introdução da armadura de reforço	19
Figura 3 - Corte BB colocação da nova armadura na escavação feita.....	19
Figura 4 - Detalhe da nova armadura com aumento da seção pela parte superior...	20
Figura 5 - Viga de concreto para reforço na laje	21
Figura 6 - Reforço de laje com reforço nas vigotas	21
Figura 7 - Corte laje demonstrando reforço.....	22
Figura 8 - Lixamento da estrutura de concreto.....	25
Figura 9 - Superfície de concreto uniformemente rugoso	26
Figura 10 - Representação esquemática das camadas de tinta epóxi	26
Figura 11 - Aplicação de Epoxi.....	27
Figura 12 - Fixação com parafusos	28
Figura 13 - Reforço de laje com chapas metálicas com adesivo e parabolts.....	28
Figura 14 - Fixação de bucha expansiva no reforço de laje com chapa.....	29
Figura 15 - Mistura da resina epóxi com a consistência homogênea	31
Figura 16 - Componentes formadores de resina.....	31
Figura 17 - Modelo de chumbadores expansivos.....	32
Figura 18 - Diagrama linear de tensões e deformações.....	39
Figura 19 – Reforço com perfis metálicos	42
Figura 20 - Colocação do perfil para reforço de lajes.....	44
Figura 21 - Aplicação do imprimador primário.....	46
Figura 22 - Corte e imprimação da fibra.....	47
Figura 23 - Aplicação das fibras e a segunda imprimação de resina de saturação...	47
Figura 24 - Laje plena e com abertura de 20% dos vãos	49
Figura 25 - Distribuição de momento fletor em torno de X para a laje plena.....	50
Figura 26 - Distribuição de momento fletor em torno de X para a laje com abertura	51
Figura 27 - Exemplo de reforço para abertura em laje	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEB	Comité Euro-Internacional do Béton
GPA	Giga Pascal
MPA	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
PAN	Poliacrilonitrila
PPL	Peso Próprio da Laje
PPV	Peso Próprio da Viga
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área
Af,tal	Área total para reforço com fibra
As	Área da seção transversal da armadura
Ar	Área de reforço
C	Cobrimento de armadura
bw	Largura da alma de uma viga
d	Altura útil
e	Espessura da chapa metálica
E	Elasticidade do concreto
Ecs	Elasticidade secante do concreto
Eci	Deformação tangencial inicial
Es	Elasticidade do aço
fs	Tensão de escoamento de calculo do aço
ff	Tensão de ruptura do laminado de fibra de carbono
Fck	Resistencia característica do concreto a compressão
Fcd	Tensão de calculo do concreto
Fc	Força resultante da seção comprimida do concreto
Fct	Resistencia a tração do concreto
Fct,m	Resistencia a tração media característica do concreto
Fyd	Tensao de calculo do escoamento do aço
Fyk	Tensão característica de escoamento do aço
Fywk	Tensão na armadura transversal passiva
Fr	Força resultante da seção tracionada do reforço
Fs	Força resultante da seção tracionada da armadura
F's	Força resultante da seção comprimida da armadura
h	Altura
l	Largura da chapa metálica
leq	Momento de inercia da seção
lef	Comprimento efetivo
W	Carga aplicada em perfil

M	Modulo resistente
Md	Momento fletor solicitante máximo na direção calculada
Mrd	Momento fletor resistente de calculo da peça
Msd	Momento resistente solicitado pela laje
S	Espaço entre as barras de armadura
Sc	Sobre carga
Vrd	Força cortante resistente de calculo
Vsd	Força cortante solicitante de calculo
X	Posição da linha neutra
Y	Peso específico do concreto
Yc	Coeficiente de ponderação da resistência do concreto
Ys	Coeficiente de ponderação do aço
Z	Braço de alavanca entre força resultante do concreto e o aço
ξ	Deformação longitudinal
ξ_c	Deformação especifica do concreto
ξ_f	Deformação especifica da fibra
ξ_{fu}	Valor de projeto de deformação axial ultima do FRP
ξ_{fi}	Deformação da face inferior do concreto
\emptyset	Diâmetro da barra de aço

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
2 ESTRUTURAS DE CONCRETO	16
2.1. CONCRETO ARMADO	16
2.2 LAJES	16
2.3 PATOLOGIAS EM LAJES	17
3 REFORÇO Á FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DO CONCRETO ARMADO	18
3.1 REFORÇO ATRAVÉS COLOCAÇÃO DE VIGAS CONCRETO ARMADO	20
3.2 CASOS REAIS SOBRE O REFORÇO DE FLEXÃO DE LAJE, COM A COLOCAÇÃO DE VIGA.....	23
4. REFORÇO Á FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DE CHAPAS METÁLICAS	25
4.1 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	25
4.2 PRODUTO USADO NA FIXAÇÃO DAS CHAPAS	30
4.2.1 Resinas adesivas	30
4.2.2 Chumbadores expansivos	32
4.2.3 Dimensionamento do reforço com chapa metálica.....	32
4.3 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS.....	37
4.4 CÁLCULO DEFORMAÇÃO INICIAL NA BASE INFERIOR DA ESTRUTURA ..	37
4.5 CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE COM REFORÇO.....	38
5. REFORÇO Á FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DE PERFIS METÁLICOS	42
6. REFORÇO Á FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO REFORÇO PRFC	45
6.1 COMERCIALIZAÇÃO DO PRFC.....	45

6.2 INSTALAÇÕES DO SISTEMA DE REFORÇO DO PRFC	45
6.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA PRFC	46
6.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA FIBRA DE CARBONO SOBRE O CONCRETO.....	48
6.5 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO.....	49
6.6 CÁLCULO DO REFORÇO COM CFRP	51
6.7 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO Á FLEXÃO COM FIBRA DE CARBONO DE ACORDO COM ACI 440.2R - 02.....	55
6.7.1 Determinação do momento resistente do reforço.....	56
7 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

A partir do elevado crescimento de obras na construção civil, aliado a variedade de materiais e tecnologias aplicadas nas elaborações de grandes projetos, os construtores puderam construir edificações cada vez mais elevadas e com tempo menor de execução. Na contramão das inovações, surgem as mais diversas manifestações patológicas tendo como decorrências o mau uso de materiais, erros construtivos nas técnicas aplicadas e de projetos, além do fator clima da região. Os agentes agressivos do meio com o passar do tempo causam degradação e mau funcionamento das estruturas de concreto. Tal fato pode causar colapso das peças estruturais provocando riscos à estabilidade e segurança das edificações (FERNANDES, 2012).

Para tentar corrigir essas patologias, diversas técnicas de reforços em estruturas de concreto armados foram desenvolvidas nas últimas décadas, sempre na busca por recuperar e aumentar a capacidade de cargas das mesmas, tendo como execução aplicações de elementos estruturais sobre as partes externas das peças. A construção em concreto armado exige conhecimentos e técnicas construtivas devido à grande importância estrutural, uma vez que seus erros constituem elevado perigo no desempenho das atividades e segurança dos usuários, além de trazerem grandes prejuízos profissionais e financeiros aos construtores responsáveis.

De acordo com Santos (2017), a escolha da técnica de recuperação mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa, analisando os problemas patológicos apresentados pela estrutura, além de fatores como disponibilidade tecnológica e relação custo/benefício.

O concreto armado uma vez projetado para determinada carga, perde sua capacidade de resistência quando solicitado com uma carga superior da projetada e fora do fator segurança principalmente por período longo. Outro fator determinante no surgimento de patologias é o envelhecimento das edificações que faz aparecer falhas, que necessitam de intervenção para reparos de seus elementos estruturais, seja por adição de novas armaduras, colagem de mantas de polímeros reforçados com fibras, aplicação de perfis metálicos ou mesmo chapas de aço através de chumbadores expansivos e resinas epóxi.

Para se ter uma boa execução de reforço é necessário conhecer o comportamento estrutural da edificação; fazer uma inspeção completa na estrutura

danificada para avaliar sua atual capacidade resistente, e assim conseguir analisar as possibilidades de reforço que oferecerão maior eficiência, economia e resultados satisfatórios com a garantia de segurança.

1.1 JUSTIFICATIVA

Demonstrar por meio desta pesquisa os métodos existentes para reforços de lajes em concreto armado, cujas patologias tenham sido originadas por falhas de projetos e execução ou falta de manutenção agregadas a idade da estrutura. Atualmente, muitas construções já estão atingindo seus limites de vida útil, ou com a durabilidade e funcionalidade das estruturas comprometidas, por surgimento de patologias que praticamente inviabilizam suas finalidades sendo necessário a reabilitação por meio de um reforço.

Os estudos sobre desenvolvimento de novos materiais de reforços, ou aprimoramento dos já existentes, estão em constantes evoluções, visando sempre atingir os melhores resultados na capacidade de suporte de carga, com custos menores desde a fabricação a aplicação. A utilização de compostos de fibra de carbono ainda não é muito utilizada e difundida no mercado nacional devido ao seu maior custo em relação à técnica mais utilizada no Brasil que é o aumento da seção transversal já existente (SOUZA, RIPPER, 1998). 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 1980, com comprovada eficácia e durabilidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar uma revisão bibliográfica das diferentes técnicas de reforço das quais permitem correções de falhas em estruturas de concreto armado com direcionamento as lajes. Será uma abordagem geral sobre o tema, mostrando as principais técnicas para reforços aplicados em laje, com suas características, procedimentos, aplicabilidades e custo total

1.2.2 Objetivos específicos

Pretende-se informar o leitor quais fatores podem determinar uma boa execução de um reforço, com indicações de como deve se proceder em cada técnica

escolhida, desde o planejamento, execução e destacando as vantagens e desvantagens entre cada uma, desenvolver uma sequencia de cálculo do reforço de flexão utilizando as chapas de aço e a fibra de carbono.

Dentre as vantagens e desvantagens destas técnicas aplicados em reforço á flexão, se faz uma comparação entre as dificuldades e facilidades na execução de cada uma, com referência aos materiais aplicados, junto com a mão de obra e os efeitos gerados na estrutura principal. As técnicas de aplicação para reforço de laje em análise são as seguintes:

- ✓ Reforço á flexão de lajes por meio do uso do concreto armado;
- ✓ Reforço á flexão de lajes por meio do uso de perfis metalicos;
- ✓ Reforço á flexão de lajes por meio do uso de chapas metalicas;
- ✓ Reforço á flexão de lajes por meio do uso de PRFC.

2 ESTRUTURAS DE CONCRETO

2.1. CONCRETO ARMADO

O uso do aço no concreto possibilitou o desenvolvimento da construção civil no século XX, principalmente devido a aderência entre o concreto e o aço. Entende-se por concreto armado uma associação de agregados graúdo (brita) com agregado miúdo (areia) com cimento e água, na qual forma-se o concreto simples, e este após receber a armadura de aço, passa a ser o conhecido concreto armado. As barras de aço existentes na armadura devem absorver os esforços de tração que surgem nas peças submetidas à tração ou flexão, pois o concreto possui alta resistência à compressão, e pequena resistência à tração (PINHEIRO, 2010).

Os aços para concreto diferenciam-se principalmente por três fatores, sendo estes: a qualidade (resistência à tração, dilatação de ruptura); a conformação superficial (laminado, áspero, nervurada); e os tipos de fabricação (não-tratado, deformado a frio) (ADÃO, HEMERLY, 2010).

2.2 LAJES

Lajes são elementos estruturais que recebem as cargas devido ao uso, assim como as cargas permanentes e posteriormente as transferem aos apoios, os quais têm por função travar e distribuir as ações horizontais entre os elementos (PINHEIRO *et al.*, 2010). Mas quando se fala em laje está se tratando exatamente de piso e tetos das edificações, assim como também se chama de lajes as tampas e fundos de caixas d'água na qual também contêm concreto armado.

Estas são as primeiras estruturas a receberem as cargas as quais foram destinadas, seja permanente ou acidental, onde em seguida as transferem as vigas. No entanto, não deixa de ser mais ou menos importante quando comparado com outros elementos estruturais a exemplo de vigas e pilares, quando o assunto é reforço.

As ações das cargas são perpendiculares ao nível da laje, e podem ser divididas em: distribuição na área (peso próprio, revestimento de piso, etc.), distribuídas linearmente (paredes) ou forças concentradas (pillar que é apoiado sobre laje). Tais ações são comumente transferidas para as vigas de apoio, mas podem também ser transmitidas diretamente aos pilares (BASTOS, 2006).

É de fundamental importância lembrar que as lajes são os primeiros elementos da estrutura que recebem a carga para qual a mesma é destinada. Além de serem elementos em duas dimensões que prevalecem sobre uma terceira (ADÃO, HEMERLY, 2010).

2.3 PATOLOGIAS EM LAJES

Com o decorrer dos tempos vive-se o surgimento no meio da construção civil de diversas tecnologias, e materiais empregados nas mais variadas utilizações. Quando se fala em concreto armado, segue-se os mesmos procedimentos, onde percebe-se que as estruturas novas comparadas com as antigas sofreram redução do seu tamanho.

As estruturas desenvolvidas atualmente visam as dimensões mínimas seguras para atender as solicitações em que esta será exigida. (CÁNOVAS 1988 *apud* MULLER 2017). Esta redução das dimensões mínimas, agregada a projetos mal elaborado, ou mau uso das estruturas, aliado a erros de execução, exposição a agentes agressivos, junto a falta de qualidade de materiais empregados, formam uma rede de fatores, que tendem a gerar diversas patologias estruturais, que muitas vezes aparecem antes de sua finalização para devido uso. Muitas vezes não se consegue evitar que ocorram o surgimento de certas patologias, por isso a necessidade de reparar as estruturas mediante o surgimento destas danificações, a fim de evitar uma ruptura da mesma, ou pela necessidade de reforço da estrutura para melhorar sua resistência e rigidez com o intuito do uso da estrutura para outra finalidade não projetada.

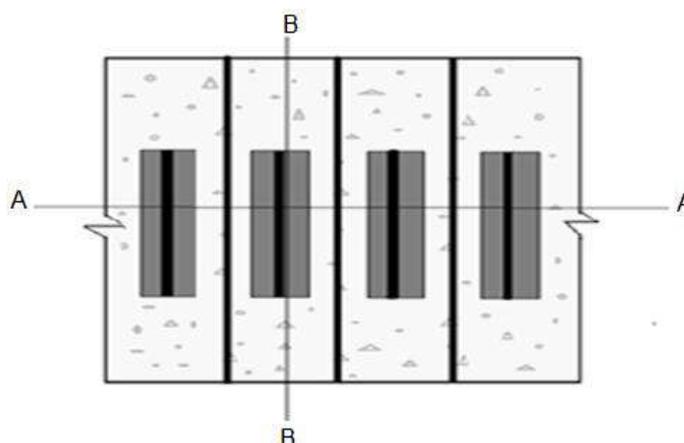
Um dos assuntos mais falados dentre a engenharia civil, se refere a vida útil, ou seja, a durabilidade das estruturas de concreto armado, e para isto ser viável é necessário a realização de manutenções preventivas e periódicas. A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6118:2014, orienta que a elaboração deve ser realizada por profissional habilitado; trata-se de um manual contendo requisitos para utilização e manutenção preventiva.

3 REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DO CONCRETO ARMADO

Diversos são os fatores que levam a realização de reforços em patologias existentes em estruturas de concreto, tem-se como aplicação, as lajes de concreto armado. Poderá ser para substituir material usado de baixa qualidade, ou até mesmo por defeito dos mesmos, por outro material de melhor qualidade e resistência superiores, ou adição de novos elementos estruturais para uma melhor redistribuição dos efeitos apresentados das ações através das deformações apresentadas no sistema estrutural. Esses novos materiais poderão ser polímeros reforçados com fibras, chapas ou perfis metálicos, ou um novo concreto com nova armaduras.

Um dos maiores problemas encontrados na execução de reforços é obter uma compatibilidade e continuidade no comportamento estrutural, entre os materiais da estrutura nova com a estrutura original. Outro fato que acontece é que, muitas vezes, é inviável se fazer um reforço na parte tracional da laje, ou seja, na parte inferior, com a colocação de parede em uma laje já existente. Para este caso é aconselhável colocar uma armação para distribuir o peso (Figura 1).

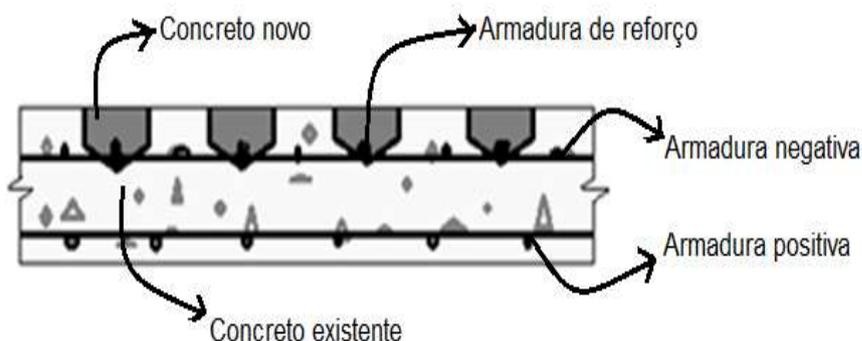
Figura 1 - Esquema de reforço por Introdução de novas armaduras em escavação feita na secção existente



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma das necessidades de construir parede sobre uma laje já existente, onde não foi projetado viga na parte inferior, será fazer com que este peso seja distribuído em uma área maior. Esta distribuição se torna mais essencial quando a laje em questão é uma laje treliçada ou pré-moldada e principalmente se estas vigotas forem paralelas a parede a ser construída (Figura 2).

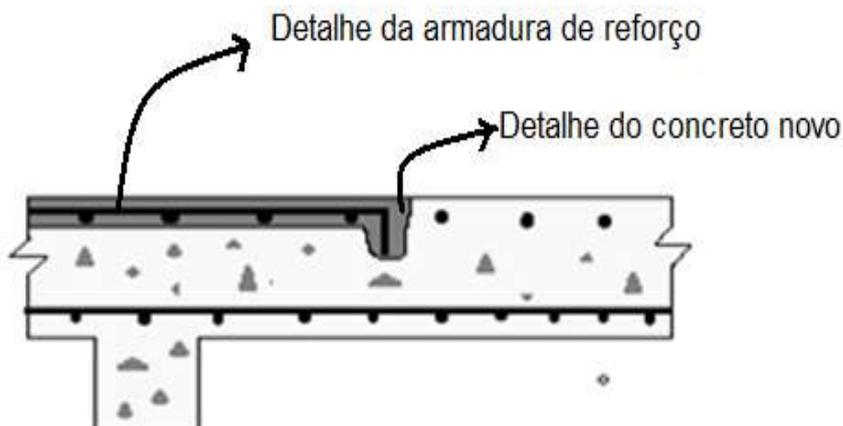
Figura 2 - Corte AA escavação para Introdução da armadura de reforço



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como apresentado Figura 2, este reforço apresentado através de escavações e colocações de armaduras, tem por objetivo receber o peso referente a uma parede a ser construída sobre a laje, e fazer uma distribuição do mesmo em uma área maior. Para a colocação destas armaduras, foi feita escavações; a Figura 3 mostra os detalhes deste corte com a referida armadura.

Figura 3 - Corte BB colocação da nova armadura na escavação feita

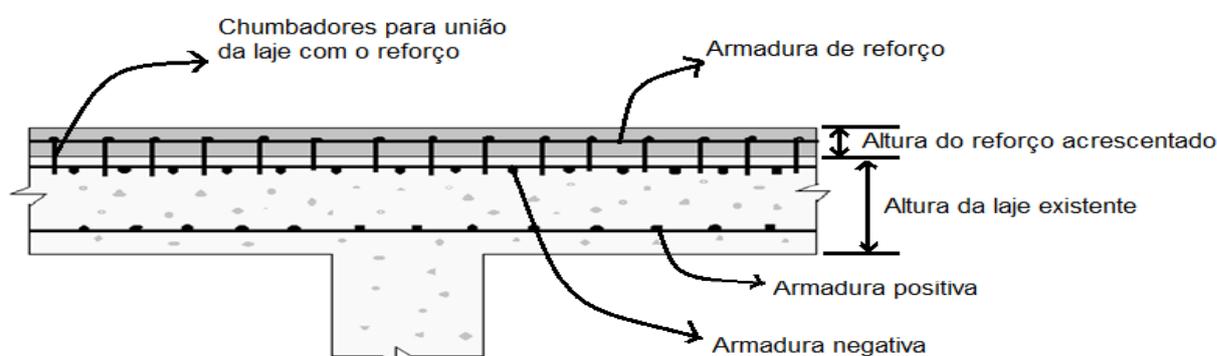


Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando as armaduras forem colocadas na secção na qual já existe, estas deverão ser colocadas após o descarregamento total da estrutura; em seguida deverá ser removido o recobrimento, assim como feito os cortes, escavados os espaços onde irão ser colocados as novas armaduras. O cobrimento destas novas armaduras, assim como o preenchimento dos cortes escavados deverão ser feitos com argamassas cimentícia com retração controlada ou argamassas poliméricas. As armaduras deverão ter um recobrimento adequado de forma a garantir a proteção ao fogo e a corrosão (DUARTE, MIGUEL, 2011).

No caso de novas armaduras serem adicionadas na parte inferior da laje, também deverá ter o cobrimento adequado para uma boa proteção, permitindo uma eficiente transmissão de tensões de corte. No entanto, essa nova armadura deverá ser fixada na estrutura existente através de conectores expansivos ou mecânico, a fim de garantir uma boa aderência entre os dois concretos. Assim como foi feito a preparação do local para aplicação de reforço superior, deverá ter o mesmo procedimento para parte inferior, ou seja, a laje não deverá ter carga, deve ser retirado toda sujeira e material danificado, bem como a realização de um escoramento adequado (Figura 4).

Figura 4 - Detalhe da nova armadura com aumento da seção pela parte superior



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 REFORÇO ATRAVÉS DE COLOCAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

De acordo com Santos (2008), os trabalhos de reforços de estruturas de concreto com problemas patológicos mais utilizados na construção civil são: adição de chapas metálicas, utilização de fibra de carbono e proteção exterior. Quando este reforço se dá pela parte inferior, pode-se colocar uma viga de concreto perpendicular as vigotas (Figura 5).

Raros são os casos em que se faz um reforço de laje na sua parte superior, como mostrado na Figura 1, isso porque existe a distribuição de um peso, que seria localizado, cuja armação colocada encontra-se numa região comprimida. O reforço escolhido para trabalhar a flexão da laje foi a construção de uma viga, esse assunto será apresentado um pouco mais adiante sobre o desenvolvimento desta técnica de reforço (Figura 5).

Figura 5 - Viga de concreto para reforço na laje



Fonte: Tecknicas (2021).

Para execução deste reforço, será preciso fazer o engastamento das armaduras, na viga que irá receber os esforços, através de furos para colocação junto com cola Sikadur 32 ou outro produto semelhante (Figura 5). Esse método de apoio para as vigotas da laje é bastante usado, e poderá ser feito com perfil metálico. Mas quando se tem um espaço onde pela sua extensão não é possível ser aplicado este tipo de reforço, aplica-se o reforço diretamente na vigota da laje. O modelo de reforço mostrado abaixo, foi aplicado com concreto armado na parte inferior de cada vigota (Figura 6), já que esta não era laje maciça.

Figura 6 - Reforço de laje com reforço nas vigotas



Fonte: APA Pinheiros e Serviços (2021).

Percebe-se (Figura 6) que foram feitos reforços em todas as vigotas da laje, com uma colocação de uma nova armadura na mesma. Caso tivesse sido previsto essa necessidade de reforço das vigotas antes de construir a laje, essa armadura teria sido colocada junto a treliça das vigotas sem alteração do layout da estrutura.

Pela impossibilidade de se colocar uma viga de concreto armado ou até mesmo um perfil metálico no sentido perpendicular as vigotas, decidiu-se por esta técnica de reforço. No entanto, para se ter um só elemento estrutura é preciso fazer o engastamento da armadura nova com a armadura existente, (Figura 7).

Figura 7 - Corte laje demonstrando reforço

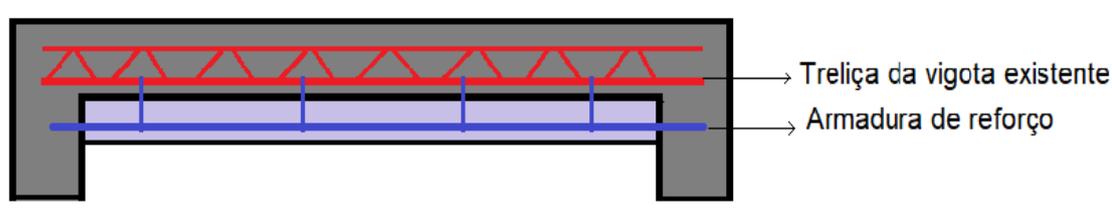


Foto: Elaborado pelo Autor.

A escolha correta do tipo de material a ser aplicado num reparo ou reforço estrutural é um passo de extrema importância no processo de recuperação de estrutura, seja um pilar, seja uma viga ou mesmo uma laje; uma vez que a estrutura está sendo alterada e, conseqüentemente, seu layout para obter uma nova resistência ou recuperar resistência perdida por conseqüência de algum desgaste. Este reforço aplicado em cada vigota, com aplicação de concreto armado (Figura 6), tem como objetivo reforçar a laje uma vez que será colocado uma carga além do que foi projetado, mas que pode ser aplicado também como uma recuperação caso seja preciso.

Quando se pretende aumentar a seção existente e não apenas reforçá-lo, pode-se fazer tanto pela parte superior como pela parte inferior, no entanto, ambas as armaduras acrescentadas deverão ser fixadas com chumbadores químicos ou mecânicos, a fim de garantir uma adequada aderência entre os dois concretos, fazendo com que o concreto novo e o concreto antigo se comportem como uma única peça (Figura 6).

Vantagens desta técnica de reforço, é que, além de um pouco mais econômico, sua execução é mais fácil e rápida para executar por contar com um material de fácil aquisição na construção civil.

Desvantagens desta aplicação de técnica de reforço com concreto armado é o tempo de espera que precisa para que o concreto novo ganhe resistência e possa ser usado com segurança, além da grande quantidade de poeiras provocada pela escavação dos locais para colocação de armaduras, assim como a retirada dos materiais, e aumento do peso da laje; o aumento da secção da mesma aumentará o esforço nas vigas e nos pilares, terminando por aumentar o esforço nas fundações.

3.2 CASOS REAIS SOBRE O REFORÇO DE FLEXÃO DE LAJE, COM A COLOCAÇÃO DE VIGA

Como foi apresentado na Figura 5, o reforço aconteceu através da colocação de uma viga. Caso semelhante ao da Figura 6, onde mostra o reforço feito diretamente em cada vigota, com uma colocação de armadura de concreto armado na parte inferior. Nos dois casos, estes reforços foram calculados adotando procedimentos para cálculos de estruturas novas, assim sendo a área de aço para o reforço das vigotas foi calculado levando-se em consideração o peso próprio da laje, agregado ao peso de pavimentação, revestimentos e sobre carga por metro, e estendendo-se em todo o pavimento.

Para os cálculos da viga (Figura 5), cujo objetivo será evitar a flexão da laje, foi dimensionado seguindo procedimento da Norma Regulamentadora. Lembrando que por ser uma viga simples, não terá armadura negativa, apenas armadura de distribuição, e, caso sua altura fosse superior a 60 cm, se colocaria armadura de pele.

Conforme demonstrado, o reforço da laje foi aplicado através da colocação de uma viga na parte inferior da mesma. Isto significa que esta viga para ser dimensionado, sua armadura deverá seguir alguns critérios seguidos por Norma, adotado no dimensionamento de viga. Neste caso da viga de reforço, por ser na parte inferior de uma laje já existente, seu enchimento requer muito cuidado, além da grande dificuldade. Pelo fato de ser preciso perfurar a laje para o enchimento da viga, e este serviço vir a provocar vibrações na laje, esta precisará ser escorada enquanto estiver sendo perfurada. Outra dificuldade é a colocação da armadura da viga no local, a qual deverá ser engastada nas vigas perpendiculares.

Esta técnica tem a vantagem da facilidade de se encontrar os materiais para a devida execução, no entanto, sua execução traz muitos transtornos e dificuldades. Como é do conhecimento de todos, precisa ser feito de forma que só

após os cuidados adotados e feito todo escoramento, se faz o preenchimento com o concreto. Mas além da dificuldade de perfurar as vigas perpendiculares para o engastamento da mesma através de resinas colantes, tem-se outra dificuldade maior que será seu preenchimento.

Portanto, para fazer o preenchimento de maneira correta da viga, deverá ser feito furos na laje o suficiente para passagem do concreto e do equipamento vibrador para um perfeito adensamento do concreto. Esta viga, por ser de concreto armado, só poderá ser retirada seu escoramento por completo a partir de 28 dias, o que os torna um dos reforços mais demorados, além de gerar muita sujeira e alteração do layout do local.

4. REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DE CHAPAS METÁLICAS

Esta técnica de reforço através de elementos metálicos é uma das mais antigas em decorrência de sua simplicidade e eficiência, além da rapidez na execução. Ela tem como vantagem permitir um maior controle de rigidez resultando na diminuição de deformação dos elementos. Mas, a exemplo do reforço com o aumento de seção, exige que a ligação entre a chapa e o concreto tenha uma boa aderência, pode ser feito por adesivos adequado ou chumbadores expansivos.

No caso de a chapa ser fixada com chumbadores, deverá ser injetado a resina entre o aço e o concreto, eliminando a probabilidade da formação de bolhas de ar na camada da resina (MARCOS, 2016). Vale salientar que está se falando em reforço de lajes de concreto com chapas metálicas, ou seja, não é recuperação de laje, assim sendo, antes de se executar qualquer tipo de reforço é necessário que se faça a recuperação da mesma.

4.1 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

O processo de reforço com chapas metálicas inicia-se com o lixamento da área a ser reforçada e a limpeza de resíduos desta etapa. Em seguida, posicionam-se as chapas metálicas nos locais estratégicos para o reforço, fazendo a aderência da mesma com resinas epóxis e fixando as chapas com parafusos (Figura 8)

Figura 8 - Lixamento da estrutura de concreto



Fonte: Soter, Stilo Shopping e Offices (2021).

A preparação da superfície para recebimento da chapa metálica é um dos fatores responsáveis pelo sucesso na aderência da chapa no concreto através da aplicação da resina, tendo sua área de aderência uniformemente rugosa e limpa isenta de partículas soltas, pintura ou óleos que impeçam a aderência perfeita do produto. A superfície de concreto deve ficar para receber a aplicação do reforço, ou seja, uniformemente rugosa (Figura 9).

Figura 9 - Superfície de concreto uniformemente rugoso

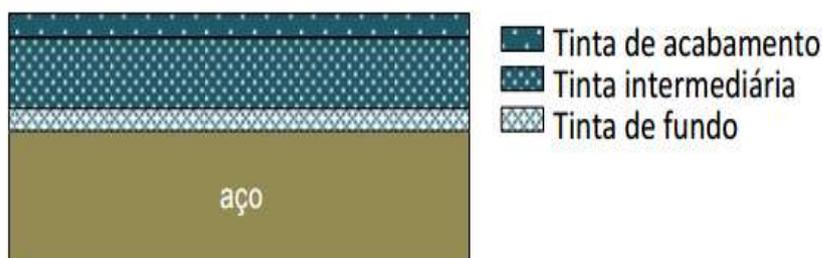


Fonte: Higashi (2016).

As superfícies das chapas de aço que não estiverem em contato com a resina devem receber tratamento de pinturas anticorrosive, aplicada sobre uma demão de primário epoxídico em pó de zinco. Além da corrosão, as chapas devem ser protegidas contra a ação do fogo, de forma que possam resistir no mínimo 30 minutos (SOUZA, RIPPER, 1998 *apud* Higashi, 2016).

O sistema mais utilizado no tratamento e pinturas anticorrosivas em chapas metálicas é a resina epóxi para a base e o poliuretano como acabamento (Figura 10), aliada à ótima resistência, à dureza da resina epóxi, e à capacidade da resina poliuretano frente às agressividades do meio ambiente.

Figura 10 - Representação esquemática das camadas de tinta epóxi



Fonte: Cardoso (2013).

É importante ressaltar que deve-se preparar a superfície da chapa de aço para se obter um bom desempenho esperado na proteção, removendo os

contaminantes da superfície e criando condições que favoreça a perfeita aderência aos esquemas de pinturas. Uma superfície seca, limpa e isenta de contaminantes e ferrugem é a base perfeita para um bom desempenho de um sistema de pinturas (FRAGATA, 2009).

O concreto base deve ter resistência adequada e solidez para receber o tratamento, sendo essencial também a preparação da superfície da junta (HIGASHI, 2016). O principal objetivo é garantir boas condições de aderência entre a peça existente e o reparo, retirando-se todo material deteriorado e as impurezas depositadas. Utilizando-se de limpezas especiais como jatos de areia ou ar comprimido, entre outras (REIS, 2001 *apud* MARCOS, 2016).

Após limpeza do substrato, concluído a preparação da chapa e tendo feito os furos para colocação dos parabolt (bucha expansiva), deve-se colocar a resina sobre a mesma para ser pressionada através da fixação dos parabolt junto a laje (Figuras 11).

Figura 11 - Aplicação de Epoxi



Fonte: Soter Stilo Shopping (2021).

Dando seguimento aos passos para aplicação da chapa metálica, a resina deve ser colocada e espalhada na superfície da laje com uma camada suficiente que, ao ser colada no concreto e pressionada junta ao mesmo, não fique espaços vazios e tenha quantidade suficiente para sair de maneira uniforme por toda a borda da chapa, eliminando a possibilidade da formação de bolhas de ar. Com isto não haverá espaços vazios para entrada de agentes agressivos ou umidade (Figura 12).

Figura 12 - Fixação com parafusos

Fonte: Soter, Stilo Shopping (2021).

Conforme anunciado anteriormente, a colocação de chapa de aço através do uso de bucha expansiva (parabolt) garante a união da chapa ao concreto evitando o uso de escoras para fazer a pressão da mesma junto ao concreto. Além do tempo de aderência e secagem da resina para retirada destas escoras, que será no mínimo 24 horas. A Figura 13 mostra o detalhe do acabamento feito com a resina nas bordas das chapas. Trata-se de um processo de rápida execução, e sem grandes acréscimos de seção, mas devido à sua pequena espessura, quando fixada apenas com adesivo epóxi, tem um grande risco de ruína com a elevação de temperaturas, e neste caso a fixação do parabolt dificulta a descolagem da mesma.

Figura 13 - Reforço de laje com chapas metálicas com adesivo e parabolt

Fonte: Htecnic (2021).

O complemento de fixação por buchas expansivas, evita a necessidade de escoramento e ao mesmo tempo, submete a chapa a uma pressão uniforme expulsando o excesso de resina existente, isso evita alguma ruína devido à separação entre a chapa e o substrato, (Figura 14).

Figura 14 - Fixação de bucha expansiva no reforço de laje com chapa



Fonte: (Htecnic, 2016).

A utilização de chapas coladas como reforço de estruturas de concreto possui diversas vantagens e algumas desvantagens, porém, segundo Souza e Ripper (1988), deve-se levar em consideração algumas restrições impostas por regulamentos, sendo a mais utilizada a de Comité Euro-International du Beton (CEB), que delimita a espessura da camada de cola, a espessura da chapa, incremento a obter nos esforços resistentes, dentre outros.

A chapa de aço possui propriedades importantes e bem próximas das encontradas no aço utilizado para armaduras, pois possui a mesma deformação, no entanto quando comparado a tensão de escoamento, o aço possui uma tensão bem maior do que nas chapas de aço (KETLEYN, 2015).

Como vantagens do reforço com chapas metálicas tem-se:

- ✓ Execução rápida, que através de um bom profissional qualificado se torna o reforço com melhor custo benefício do mercado.
- ✓ Baixos níveis de ruído, o que ao se tratar de uma obra já existente e com pessoas convivendo no local é uma opção para não ser interrompida as atividades.
- ✓ Não modifica a geometria da estrutura reforçada, podendo ser revestida por argamassas após a sua cura, tornado-se imperceptível.

Segundo Branco (2012) além das vantagens mostradas acima, o reforço permite uma melhoria significativa da capacidade resistente (até 50%), intervenção sem interrupção do uso da estrutura e não demolição dos elementos estruturais.

Apesar de ser um reforço que apresenta um melhor desempenho e menor custo entre os demais sistemas de reforços, este apresenta as seguintes desvantagens:

- ✓ Exposição a ataques químicos na chapa metálica;
- ✓ Deterioração da resina epoxidica em elevadas temperaturas sobre as mesmas;
- ✓ Impossibilidade de visualizar surgimentos de futuras fissuras;
- ✓ Necessidade de criar juntas de ligação entre chapas, devido as limitações das dimensões para o seu transporte.
- ✓ Por ser elemento de aço, necessita de tratamento de prevenção contra corrosão.

4.2 PRODUTO USADO NA FIXAÇÃO DAS CHAPAS

4.2.1 Resinas adesivas

De acordo com Branco (2012) *apud* Higasti (2016), as resinas epóxicas apresentam diversas vantagens, entre as quais:

- ✓ Boa capacidade de aderência a diferentes suportes;
- ✓ Ótima resistência mecânica;
- ✓ Resistência á corrosão;
- ✓ Tempo de cura baixo;
- ✓ Boa capacidade para acomodar superfícies de colagem irregulares ou espessas;
- ✓ Baixa fluência;
- ✓ Comparada com poliésteres, acrílicos e vinis possui baixa retração.

A mistura deve ser realizada através de um agitador mecânico ou manual, fazendo com que a mesma se torne uma mistura homogêneas (Figura 12). Após a mistura da resina com o endurecedor, o material permanece viscoso durante certo tempo, o qual se pode trabalhar com o adesivo. Este intervalo de tempo denomina-se “pot life” (SOUZA, RIPPER, 1998 *apud* HIGASHI, 2016).

Figura 15 - Mistura da resina epóxi com a consistencia homogenica



Fonte: Souza (2008).

Souza e Ripper (1998) *apud* Silva (2006) citado por Luiz (2015), sugerem algumas considerações para o reforço com chapas metálicas, quais sejam:

- ✓ Espessura máxima de cola: 1,5 mm
- ✓ Espessura máxima das chapas de 3mm, salvo quando utilizados dispositivos especiais de ancoragem, como parafusos parabolt de até 8 mm.
- ✓ Não superior em 50% o incremento nos reforços resistentes, comparada á situação anterior ao reforço.

Outra forma de misturar a resina com o endurecedor, com maior garantia e segurança, é através de um aplicador. Segundo Gamino, (2007) para a fixação destes componentes metálicos em estruturas de concreto, seja pilar, vigas ou lajes, deve-se usar resina que seja bi-componente. Ou seja, com a mistura sendo através de bico injectador do aplicador. Uma desta resina recomendada para colagem de chapas metálicas é a Hilti HIT-RE 500 da HILTI, indicada para reforços e fixação de peças em concreto (Figura 16).

Figura 16 - Componente formadores de resina



Fonte: Htenic (2021).

Característica desta resina:

- ✓ Tixotrópica;
- ✓ Cura rápida;
- ✓ Sem odor;
- ✓ Sistema de injeção manual e bico misturador;
- ✓ Bom desempenho em superfícies úmidas;
- ✓ Bom desempenho em furos com coroas diamantadas.

4.2.2 Chumbadores expansivos

Os chumbadores deverão ser conforme modelo, no qual é chamado de expansivo, por existir uma bucha metálica acoplado no seu corpo, na qual se expande ao ser feito o aperto. Dentre as vantagens do reforço com chapa metálica:

- ✓ Maior rapidez na execução, com pouquíssima sujeira no local;
- ✓ Não utiliza material molhado nem úmido;
- ✓ Não requer instalações auxiliares importantes;
- ✓ O resultado do acréscimo da seção é muito pequeno;
- ✓ Pouca interferência no uso da estrutura durante a execução do reforço.

Figura 17 - Modelo de chumbadores expansivos



Fonte: Soldasul (2021).

4.2.3 Dimensionamento do reforço com chapa metálica

Aplicar alguma técnica de reforço em uma estrutura significa ter o resultado de uma análise da situação que a mesma se encontra e principalmente para qual finalidade será solicitada. O exemplo aqui utilizado é o de dimensionamento de laje; efetuado tendo como base a norma NBR 6118/2014, e os procedimentos adotados no método demonstrado por Roberto Chust Carvalho e Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho.

Antes de dimensionar um reforço, é preciso obter todas as informações da estrutura, que neste caso será uma laje.

✓ O Tipo de laje

Determinar o tipo de uma laje significa escolher entre laje maciça, cogumelo, nervura ou pré-fabricada, conforme suas especificações.

✓ Classificar quanto à direção

Significa determinar a direção ou direções referentes a armadura principal em lajes modelos retangulares.

Laje armada em uma direção, por ter relação do lado maior com o menor superior a dois.

Onde o vão maior será o l_y e o vão menor o l_x

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2 \quad \text{eq (n. 1)}$$

Laje armada em duas direções, quando a relação entre o lado maior e o menor for inferior ou igual a dois.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad \text{eq (n. 2)}$$

✓ Vão efetivo das lajes nas principais direções.

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad \text{eq (n. 3)}$$

$$a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3h \end{cases} \quad \text{e} \quad a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3h \end{cases}$$

Sendo que l_0 é o espaço entre os apoios e t_1 e t_2 , são os apoios da laje, ou seja, a base das vigas.

✓ Vinculações das bordas, ou seja, se é apoiada, livre ou engastada.

✓ Quais carregamentos nas lajes.

$$P = g + q \quad \text{eq (n. 4)}$$

Onde temos:

p = carregamento uniformemente distribuído;
 g = parcela permanente das cargas que atuam sobre a laje;
 q = parcela variável das cargas atuando sobre a laje.

✓ Espessura mínima deve ser respeitado os limites mínimos para espessura, determinado pela norma NBR 6118/2014, sendo:

- 7 cm para lajes de cobertura não em balanço;
 - 8 cm para lajes de piso não em balanço;
 - 10 cm para lajes em balanço;
 - 10 cm para lajes que suportem veículos de peso menor ou igual a 30KN;
 - 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30KN;
 - 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com mínimo de L/42 para lajes de piso biapoiadas e L/50 para lajes de piso contínuas;
 - 16 cm para laje lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.
- ✓ Para poder determinar o cobrimento mínimo deve-se classificar o nível de agressividade ambiental, (quadro 1).

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ¹⁾ , 2)	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ¹⁾ , 2)	
IV	Muito forte	Industrial ¹⁾ , 3)	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118 (2014).

Para garantir o cobrimento mínimo (c_{min}), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), onde será acrescentado uma tolerância de execução (Δc) ao cobrimento mínimo.

$$C_{nom} = C_{mín} + \Delta C$$

eq (n. 5)

A partir dos valores de agressividade ambiental é possível relacionar o cobrimento nominal correspondente (Quadro 2).

Quadro 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ⁴⁾	30		40	50
Concreto Protendido ¹⁾	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118 (2014).

✓ Estimativa para Altura da Laje

Para se estimar a altura das lajes, deve-se calcular com base no seu comprimento na qual será o l_x , cuja medida será a do menor vão.

$$h = l_x/40 \quad \text{eq (n. 6)}$$

Após calculada a altura da laje pode-se determinar qual será a altura útil da mesma, conforme equação:

$$d = h - \emptyset/2 - c \quad \text{eq (nº 7)}$$

✓ Determinação dos momentos fletor solicitante, baseado no modelo de laje, neste caso exemplificado trata-se de uma laje totalmente apoiada em uma só direção.

- $M_K = P \cdot l^2/8$

- $M_D = 1,4 \cdot M_K$

A NBR 6118:2014 determina valores limites de deslocamento para um comportamento adequado da estrutura em serviço. Para o cálculo das flechas, deve-se utilizar o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) e o módulo de deformação tangencial inicial (E_{ci}) que será calculado pelas seguintes expressões:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad \text{eq (n. 8)}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot f_{ck}/80 \leq 1,0 \quad \text{eq (n. 9)}$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot f_{ck}^{1/2}, \text{ para } 20 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa} \quad \text{eq (n. 10)}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E (f_{ck}/10 + 1,25)^{1/3}, \text{ para } 55 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ Mpa} \quad \text{eq (n. 11)}$$

Sendo que:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásico;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Com estes valores definidos, pode-se calcular o valor das flechas.

✓ Flecha imediata, onde será calculada pela seguinte expressão:

$$f(t=0) = k \frac{P_{d,ser} \ell^4}{E_{cs} I_{eq}} \quad \text{eq (n. 12)}$$

Sendo:

K = coeficiente tabelado;

ℓ = menor vão da laje;

I_{eq} = momento de inércia da seção;

$P_{d,ser}$ = combinação quase permanente de serviço.

✓ Flecha de Longa Duração, onde é calculada pela seguinte expressão:

$$f(t=\infty) = (1+\alpha f) f(t=0) \quad \text{eq (n.13)}$$

Onde:

αf = coeficiente baseado nas deformações por fluência do concreto.

Para um cálculo conservador, a favor da segurança, admite-se $t = \infty$ e $t_0 = 1$ mês, resultando em $\alpha f = 1,32$.

✓ Flecha Admissível, sendo que para laje a flecha admissível será:

$$f_{adm} = \ell/250 \quad \text{eq (n. 14)}$$

No caso da flecha de longa duração ser superior á flecha admissível, deve-se aumentar em 1 cm a espessura da laje e recalculer os valores.

Dimensionamento das Armaduras, sendo que á flexão simples deve ser feita para cada direção da laje, ou seja, em x e y. Portanto o cálculo é feito de forma semelhante ao feito em viga, onde se considera a dimensão de 1 metro para b. Com isso se determina a posição da linha neutra através da expressão seguinte:

$$X = 1,25 * d * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Md}{0,425 * f_{cd} * b * d^2}}\right) \quad \text{eq (n. 15)}$$

A área de aço, portanto será:

$$A_s = \frac{\alpha_c \lambda f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad \text{eq (n. 16)}$$

Onde:

λ é determinado por:

$\lambda = 0,8$ para $f_{ck} \leq 50$ MPa;

$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400$ para $f_{ck} > 50$ MPa.

α_c é determinado por:

$\alpha_c = 0,85$ para $f_{ck} \leq 50$ MPa;

$\alpha_c = 0,85 [1,0 - (f_{ck} - 50)/200]$ para $55 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa.

M_d é o momento fletor solicitante máximo na direção calculada;

f_{cd} e f_{yd} são determinados por:

$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$

eq (n. 17)

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$

eq (n. 18)

Considerar $\gamma_c = 1,4$

$\gamma_s = 1,15$

Para garantir condições apropriadas de ductilidade no estado limite último em um regime rígido-plástico, a posição da linha neutra deve ficar limitada em:

$$x/d \leq 0,45 \quad \text{eq (n. 19)}$$

✓ Detalhamento das Armaduras: estas devem garantir os limites máximos e mínimos para as armaduras, sendo que:

- Armadura máxima: soma das armaduras $A_s + A'_s \leq 4\% A_c$;

- Armadura mínima: determinado pelas tabelas 17.3 e 19.1 da norma NBR 6118/2014.

- Diâmetro máximo: $\varnothing_{\text{máx}} = h/8$;

- Espaçamento máximo: o espaçamento deve ser de no máximo $2h$ ou 20 cm;

- Armadura de contorno: deve-se colocar armadura de contorno nos apoios onde a laje termina, com um valor de $0,67 \cdot p_{\text{min}}$, não sendo menor que $\varnothing 5$ c/20 cm, com uma extensão igual a $1/5$ do menor vão da laje.

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS

Para fazer o dimensionamento do reforço, deve-se primeiro considerar a laje com ou sem o carregamento inicial. A escolha irá compactar diretamente na área necessária de reforço a ser aplicado na estrutura. Com a laje descarregada, a carga que o reforço irá resistir inicialmente, será apenas o peso próprio da estrutura.

4.4 CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO INICIAL NA BASE INFERIOR DA ESTRUTURA

Para o cálculo da deformação inicial da base inferior da estrutura deverá ser determinado o momento solicitante de projeto que atua. Através do equilíbrio de forças pode-se definir o momento solicitante de projeto no ponto do centro de gravidade da armadura de tração, resultando na equação:

$$M_{sd} = F_c \cdot (d - 0,8x/2) = 0,85 \cdot x \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot (d - 0,8x/2) \quad \text{eq (n. 20)}$$

O cálculo da posição da linha neutra pode ser determinado através da equação do segundo grau pelo modelo $ax^2 + bx + c = 0$, sendo X a posição da linha neutra e os coeficientes a , b e c determinados pelas equações:

$$a = b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (0,8^2/2) \quad \text{eq (n. 21)}$$

$$b = - (b_w \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot d) \quad \text{eq (n. 22)}$$

$$c = M_{sd} \quad \text{eq (n. 23)}$$

Após determinar a linha neutra, calcula-se a força referente á armadura de tração pela equação seguinte:

$$F_s = M_{sd} / (d - 0,8x/2) \quad \text{eq (n. 24)}$$

Com isto, calcula-se a tensão e a deformação da armadura:

$$f_s = F_s / A_s \leq f_{yd} \quad \text{eq (n. 25)}$$

$$\varepsilon_s = f_s / E_s \quad \text{eq (n. 44)}$$

Após obter estes dados, pode-se então determinar a deformação inicial da base inferior da estrutura pela equação seguinte:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_s \cdot (h - x) / (d - x) \quad \text{eq (n. 26)}$$

4.5 CÁLCULO DO MOMENTO RESISTENTE COM REFORÇO

Segundo Machado (2002), o cálculo da área de reforço é um processo iterativo, pois considera inicialmente que a estrutura seja normalmente armada. Isto significa que seu limite está entre os domínios 2 e 3 dos modos de ruptura. Portanto será considerado a deformação do aço tracionado de 1% e a deformação máxima do concreto comprimido é de 0,35%. Através da semelhança de triângulos, pode-se determinar a posição da linha neutra, as forças correspondentes ao concreto, às armaduras e ao reforço e a área de reforço necessária.

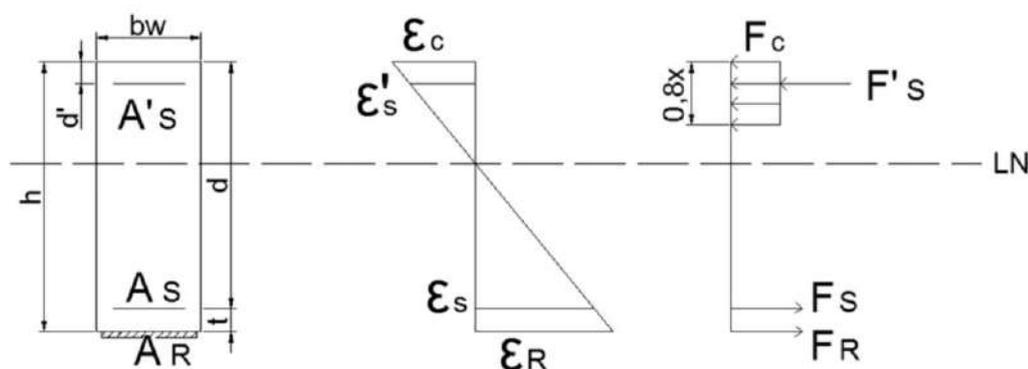
Com isto pode-se determinar posição da linha neutra através da equação seguinte:

$$x = d \cdot \varepsilon_c / (\varepsilon_c + \varepsilon_s) \quad \text{eq (n}^\circ \text{ 27)}$$

Com a posição da linha neutra obtida, calcula-se as forças correspondentes ao concreto e às armaduras e o momento fletor no ponto A; caso seja superior ao momento solicitante, continua-se o processo para a determinação da força correspondente ao reforço (F_r); caso o momento fletor no ponto A seja inferior, ou muito superior, ao momento solicitante, deve-se determinar uma nova posição da linha neutra até obter valores aceitáveis.

Com o momento resistente e a posição da linha neutra determinados, calcula-se os somatórios dos momentos fletores referentes aos pontos B e C (Figura 18) encontrando o valor da força correspondente ao reforço.

Figura 18 - Diagrama linear de tensões e deformações



Fonte: Machado (2002); Pivatto (2014).

Considerando que:

- F_c = força resultante da seção comprimida do concreto;
- F'_s = força resultante da seção comprimida da armadura;
- F_{s+} = força resultante da seção tracionada da armadura;
- F_r = força resultante da seção tracionada do reforço.

Os valores dessas resultantes são determinados, segundo Machado (2002), por:

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot 0,85 \cdot \Psi \cdot (f_{ck}/1,4) \quad \text{eq (n. 28)}$$

$$F'_s = A'_s \cdot f'_s \quad \text{eq (n. 29)}$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \text{eq (n. 30)}$$

$$F_r = A_r \cdot f_r \quad \text{eq (n. 31)}$$

Tendo:

$$f'_s = f_s = f_{yd} / \gamma_s \quad \text{eq (n. 32)}$$

Através de semelhança de triângulos, determina-se a deformação na linha do reforço, pela equação:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_c \cdot (h - x) / x \quad \text{eq (n. 33)}$$

O dimensionamento de chapas metálicas como reforço estrutural pode seguir o mesmo procedimento do reforço por fibras, modificando as propriedades e características do material de reforço (SANTOS, 2008). Para este trabalho, foi utilizada a chapa de aço carbono A36, com as seguintes propriedades contidas na tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades da chapa metálica

Propriedade	Chapa Aço Carbono A36
Resistência à Tração (MPa)	400 a 550
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Limite Mínima de escoamento (Mpa)	250
Espessura Nominal (mm)	4,75 a 15
Resistência á Compressão (Mpa)	152
Densidade (g/cm ³)	7,85
Dureza (HB)	130 a 150

Fonte: Gelsonluz (2011).

Calcula-se a força correspondente ao reforço, e em seguida as deformações na linha deste reforço, para determinar a área de reforço tendo como deformação máxima do reforço, o limite de escoamento da chapa metálica, que possui o valor de 1%. Adotando a semelhança de triângulos, tem-se:

$$\varepsilon_r \leq 1\% \quad \varepsilon_s < 1\%$$

O valor da tensão resistente do reforço por chapa metálica será a tensão de escoamento do material, considerando o fator de minoração da resistência do aço (γ_s).

Determinados os valores da força correspondente ao reforço (F_r) e a tensão resistente do reforço (f_r), pode-se calcular a área de reforço a partir da equação:

$$A_r = F_r / f_r \quad \text{eq (n. 34)}$$

A largura da chapa é determinada seguindo o mesmo procedimento usado para se determina a largura dos compósitos de fibras, ou seja:

$$l_i = A_r / e$$

Sendo: (e) = a espessura da chapa metálica em cm

5. REFORÇO Á FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO DE PERFIS METÁLICOS

Esta técnica de reforço por adição de perfis metálicos é apresentada através da Norma Regulamentadora (NR) 8800 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Segundo essa norma trata-se de projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de concreto de edifícios como auxílio para dimensionamento dos elementos a serem utilizados. Com relação a outras técnicas de reforço, essa, que é feita através de perfis metálicos (Figura 19), não será obrigatoriamente ligado ao elemento de concreto através de resinas, ou seja, poderá ser feita apenas com parafusos chumbadores tornando-se assim um elemento misto. No entanto, caso se resolva acrescentar, além dos parafusos, a cola resina na fixação, a superfície de concreto deverá ter os mesmos cuidados na preparação a exemplo das colagens de chapas e fibras.

Figura 19 – Reforço com perfis metálicos



Fonte: Nucleofix (2021).

No exemplo mostrado acima, percebe-se que a aplicação de reforço na referida laje, exige fazer o reforço também do pilar; ele é realizado com aplicação do mesmo tipo de perfil. Isso acontece muitas vezes pelo fato de construírem estruturas sem um devido cálculo, e quando aparece uma flecha e procuram um profissional para aplicar um reforço verifica-se que além da laje precisa-se reforçar o pilar, que neste caso não é o nosso objetivo.

Diferente da viga de concreto na qual é feita no local e necessita de muitas ferramentas e materiais, trabalhar com perfil metálico requer conhecimentos específicos além de mais dificultoso e com grau de risco de acidente muito maior. Seu peso comparado com a viga de concreto é muito inferior, mas como já vem pronta, se torna um serviço perigoso. E por necessitar de uma mão de obra especializada, esta se torna mais cara devido a carência de profissionais habilitados. Devido ao peso destas peças pelo fato de serem peças já prontas, a maioria das vezes precisa-se de equipamentos específicos para elevação, assim como espaço para montar suporte.

Os perfis de aço assim como as chapas metálicas deverão ser protegidas contra a ação do fogo através de barreiras de proteção ou pinturas que garantam proteção de, no mínimo, 30 minutos (JUVANDES,2002).

No Brasil, o uso de reforços através de perfis metálicos ainda é menor quando comparados a outros países, muito embora nas últimas décadas tenha crescido bastante esta opção de reforços em laje através de perfil metálico, seja perfis laminados ou soldados. Mas, os processos de recuperação ou mesmo de um reforço seja, na laje como é nosso caso, ou em qualquer elemento estrutural dependem de etapas básicas de estudo e análises da estrutura, ou seja, a informação sobre a estrutura existente, qual sua carga estimada, assim como o desenho e o detalhe do reforço escolhido.

A preparação da superfície de concreto é a mesma para perfis e chapas, assim como será o mesmo tratamento adotado para as superfícies metálicas, quer em termos de preparação, ou para proteção. A diferença estará no sistema que, nos perfis, conta com a presença dos chumbadores, normalmente buchas expansivas, e, somente após o aperto dos chumbadores é que deverá ser feita a injeção de resina para fazer o preenchimento do vazio existente entre as superfícies de concreto e de aço. A resina a ser utilizada, neste caso, deve ter viscosidade bem inferior à utilizada na colagem de chapas, pois trata-se de um processo de injeção.

Após o posicionamento e a fixação do perfil (abertura das buchas), deve-se proceder a vedação ao redor de todo o seu perímetro, com exceção dos pontos onde serão dispostos os tubos plásticos, aproximadamente a cada 20cm, por onde será feita a injeção, que deve seguir metodologia idêntica a aplicada no tratamento de fendas no concreto (SOUSA, 2008).

O correto para se colocar o perfil como reforço de flexão de laje, será retirar o reboco para que o perfil fique colado direto nas vigotas (Figura 20). Após a colocação do perfil, preencher todos os espaços vazios entre a laje e o mesmo.

Figura 20 - Colocação do perfil para reforço de lajes



Fonte: Metal Concept (2021).

A vedação deve ser feita no furo feito para os chumbadores, de modo que fique tapado por completo o espaço entre o corpo da bucha, e o orifício produzido para passagem desta pelo perfil. Devem ser utilizadas preferencialmente bombas de injeção apropriadas com dosadores da mistura a dois componentes (a resina e o endurecedor), os quais só deverão ser misturados na cabeça de injeção. Esta injeção deverá ser contínua, com pressão rigorosamente controlada, estas também são conhecidas como chumbadores químicos.

Após a colocação e chumbamento da viga refazer o acabamento de vedação. Neste caso, estes chumbadores (parabolt) poderão ser fixados, usando apenas a cola para concreto a Sikadur 32 nos furos do concreto após a limpeza, e em seguida a colocação dos chumbadores. (KETLEYN, 2015).

6. REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES POR MEIO DO USO REFORÇO PRFC

6.1 COMERCIALIZAÇÃO DO PRFC

A comercialização de fibras utilizadas na fabricação de PRFC pode ser feita em diversas modelos e formas. Sendo que para reforço externo de estruturas as formas mais utilizadas são as de tecidos, mantas e laminados. Os tecidos são formados pela tecelagem das fibras, já as mantas são um conjunto de fibras dispostas em determinada orientação.

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas tais como o poliacrilonitrila (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e também através de fibras de rayon.

Importante ressaltar que o coeficiente de dilatação termica ou temperatura de transição vítrea da fibra de carbono na qual o polímero começa a amolecer gira em na faixa de 80°C a 100°C, onde a partir daí seu módulo de elasticidade começa a ser reduzido, perdendo sua resistência a tração (MACHADO, 2010).

No Brasil, fibras de carbono e de vidro são facilmente encontradas. Empresas como Advanced Vacuum Hi Tech Composites, BASF Construction Chemical, Viapol entre tantas outras comercializam fibras de diversos formatos.

Tabela 2 - Características genéricas das fibras de carbono

Tipo da Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade(GPA)	Resistência Máxima de Tração(MPA)	Deformação de Ruptura(%)
De uso geral	220-235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220-235	3.790-4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220-235	4.825-6.200	> 1,5
Alto módulo	345-515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515-690	> 2.410	> 0,2

Fonte: Wiebeck; Harada (2005).

6.2 INSTALAÇÕES DO SISTEMA DE REFORÇO DO PRFC

Os sistemas compostos estruturados com fibras, seja de carbono ou de vidro, são aderidos externamente às estruturas nas quais serão reforçadas. Sua eficiência e propriedades desejadas no reforço de estruturas está condicionada a

necessidade de uma boa recuperação e preparação do concreto onde será feito à aplicação dos sistemas PRFC.

A primeira etapa será providenciar a correção das manifestações patológicas presentes no substrato de concreto, a exemplo das fissuras e trincas, ou até mesmo corrosão de armaduras que devem ser reparadas, com as devidas técnicas para se poder continuar com o processo de aplicação. A preparação da superfície do concreto visa a melhor eficiência na ligação entre os meios aderidos, resultando no aumento da qualidade de transferência de tensões. A limpeza deve retirar todo material que não esteja totalmente aderido, poeiras ou pó, substâncias oleosas e recobrimentos existentes sobre o concreto, como pinturas e argamassas (MACHADO, 2010).

6.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA PRFC

A aplicação deste sistema PRF tem início com a aplicação de imprimadores primários (Figura 21). tais imprimadores são utilizados na preparação da superfície da estrutura que irá receber o compósito. Ele penetra no substrato do concreto e cria, através de seu adesivo específico, pontes de aderência para as resinas que serão aplicados posteriormente. Aplicam-se imprimadores primários somente onde serão colocadas fibras (Machado, 2010).

Figura 21 - Aplicação do imprimador primário



Fonte: Machado (2010).

Caso seja necessário, utilizar reguladores de superfície que preencham os vazios ou corrijam imperfeições existentes na superfície da estrutura. O objetivo é

fornecer uma superfície lisa e despenada para garantir a perfeita colagem do compósito, evitando pontos de tensões indesejados na fibra (MACHADO, 2010). Pode-se cortar as fibras nas dimensões de projeto, e aplicar as resinas de saturação, as quais são utilizadas para a imprimação das fibras que constituem o reforço estrutural dos compostos. Seu objetivo é fornecer um meio efetivo para a transferência das tensões de cisalhamento entre as fibras dos compósitos.

A imprimação com resina saturante (Figura 22) pode ser feita diretamente na superfície do concreto ou nas fibras, antes de serem colocadas em contato com a estrutura (MACHADO, 2010).

Figura 22 - Corte e imprimação da fibra



Fonte: Machado (2010).

Ao se instalar as fibras na estrutura, é feita uma segunda imprimação com a resina de saturação para garantir o perfeito encapsulamento das fibras (Figura 23).

Figura 23 - Aplicação das fibras e a segunda imprimação de resina da saturação



Fonte: Machado (2010).

Para proteger a superfície dos compósitos colados de possíveis danos, a exemplo de agentes químicos, abrasão ou luz ultravioleta, pode-se aplicar revestimentos protetores, para assim garantir uma vida útil maior. O reforço estrutural se fundamenta no aumento ou recuperação da resistência das peças de concreto armado a partir do aumento da seção geométrica e acréscimo de armaduras. Essa solução é indicada quando as construções antigas ou novas estão sujeitas a sobrecargas não previstas no projeto original, ou quando a edificação vai passar por intervenção que possa ocasionar fragilidade na estrutura.

6.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA FIBRA DE CARBONO SOBRE O CONCRETO

As vantagens do uso da fibra de carbono sobre o concreto estão relacionadas à:

- ✓ Agilidade na aplicação e redução no tempo da obra - o compósito de fibra de carbono atinge 100% da sua resistência em apenas 7 dias. Já o concreto precisa de 30 dias. Dessa forma, o uso da fibra é capaz de reduzir entre 60% e 70% o tempo da realização de uma obra de reforço.
- ✓ Praticidade - a aplicação das fibras de carbono também é mais prática, pois sua aderência junto ao elemento estrutural é feita com resina epoxidica, resultando na diminuição no tempo de aplicação do material.
- ✓ Maior durabilidade - com baixíssimo coeficiente de dilatação e alta rigidez, a fibra de carbono possui resistência excepcional a todos os tipos de ataques químicos, não sendo afetada, por exemplo, pela corrosão, como acontece com o aço.
- ✓ Alta resistência - as fibras de carbono apresentam tem característica principal elevada resistência à tração e elevado módulo de deformação, os valores superam as propriedades dos aços de mais avançada tecnologia. Ou seja, o reforço a partir das fibras de carbono confere elasticidade à construção e resiste a impactos de maior intensidade.
- ✓ Baixa densidade - devido à sua baixa densidade, a fibra de carbono não provoca aumento da sobrecarga. Por isso seu uso é ideal para áreas onde não se permite alteração no espaço arquitetônico como garagens e locais com portas e janelas.

Desvantagens do uso da fibra de carbono como reforço:

- ✓ Incompatibilidade com superfície irregular;
- ✓ Baixa resistência ao fogo e a exposição aos raios ultravioletas;
- ✓ Ruptura frágil, não apresenta um patamar de escoamento definido ou alguma indicação de ruptura iminente.

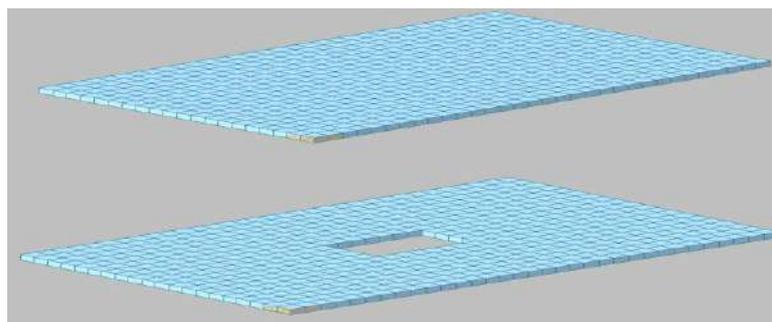
6.5 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO

No dimensionamento de uma viga para resistir o momento gerado por uma laje, todo tipo de reforço a ser adotado necessita que se tenha a carga da qual este reforço irá resistir. E isto é aplicado nos reforços por viga, perfil, chapa metálica e fibra de carbono. Quando se determina a área de aço a ser aplicada como reforço na viga, calcula-se usando as equações da norma (NBR 611, 2014), mas para este cálculo da fibra de carbono o autor contou com ajuda de um software para agilizar os resultados.

6.5.1 Estudo de caso 1

Considera-se uma laje de galpão industrial de espessura 12 cm, com dimensões Lx igual a 8 metros e Ly 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. Para aplicar o reforço com manta de fibra de carbono na correção do aumento do momento fletor resultante da abertura desta laje, utiliza-se o momento fletor calculado através de simulação de um software (Figura 24), feito por Renan Teixeira Mendes em 2017.

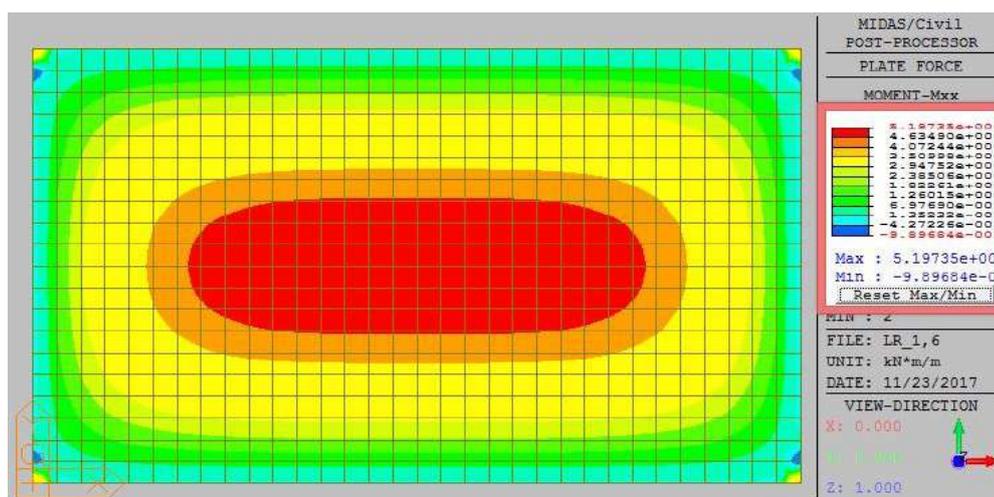
Figura 24 - Laje plena e com abertura de 20% dos vãos



Fonte: Mendes (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 24. Os resultados da análise estão mostrados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Distribuição de momento fletor em torno de X para a laje plena

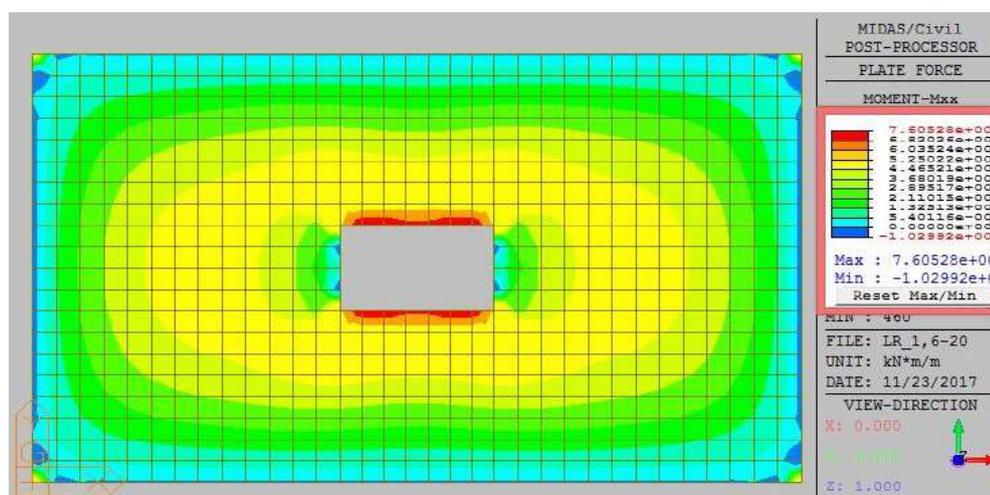


Fonte: Mendes (2017).

Conforme simulação feita pelo software em uma laje com estas dimensões, sem nenhuma abertura, mas apenas analisando o momento fletor máximo, obteve o valor de 5,20 KNm. Na realidade este valor corresponde ao MK, usado no cálculo manual de laje, ou seja, teria-se que multiplicar pelo valor de 1,4 referente ao coeficiente de segurança. Portanto teríamos o nosso MD = (5,20knm x 1,4) = 7,28 KNm. Assim sendo poderíamos seguir todos os passos referente ao cálculo de uma laje até chegarmos as armaduras.

Segundo o resultado do software usado por Mendes (2017), na simulação da mesma laje contendo uma abertura de 160cm por 100cm, localizado no centro da laje, onde o momento fletor é o máximo, foi de 7,61KNm (Figura 26).

Figura 26 - Distribuição de momento fletor em torno de X para a laje com a abertura



Fonte: Mendes (2017).

Conforme demonstrado pelo software, o centro da laje onde foi feita uma abertura, sofreu um aumento de 2,41KNm no seu momento fletor máximo, onde o mesmo ficou em 7,61KNm. Portanto, o nosso MD para referência de cálculo será 7,61knm x 1,4, ficando com um valor de 10,65KNm.

Não será calculado uma laje para se construir com esta abertura, e sim calculado um reforço de uma laje já existente sem a devida abertura, para que este passe a resistir o momento fletor provocado pela abertura, onde este resista no mínimo o momento fletor de 10,65KNm, gerado pela abertura conforme software.

6.6 CÁLCULO DO REFORÇO COM CFRP

Para determinar esse reforço através da manta de fibra de carbono, aplicado na parte inferior da laje ao redor da abertura, para combater a flexão da mesma, deve-se obter as características mecânicas da manta a ser usada. Na tabela 3, tem-se todas essas informações necessárias para dimensionamentos referentes as características do PRFC. A Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) estabelece os padrões e características físicas e mecânicas do CFRP.

Tabela 3 - Características físicas e mecânicas do CFRP

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

Fonte: ABECE (2006).

Para iniciar o dimensionamento de reforço de uma laje deve-se considerar que a mesma esteja ou não com seu carregamento inicial, pois esta escolha vai impactar na área necessária de reforço a ser aplicado na estrutura. Neste caso, como a laje está sendo reforçada para suprir a resistência à tração perdida com a abertura, seu cálculo será como se estivesse carregada, sendo a carga o momento fletor máximo determinado pelo software com a atribuição do coeficiente de majoração, ou seja 10,65KNm.

Com os dados fornecidos pelo software, e seguindo métodos desenvolvidos em reforço de estrutura de concreto armado com sistema compostos FRP foi encontrado a área de reforço a ser aplicado (MACHADO, MACHADO, 2015).

Fazendo o cálculo normal da laje sem a abertura, e obedecendo os requisitos da norma NBR 6118 (2014), onde mostra que o cálculo de laje é feito com base de um metro, temos para esta laje 1,91cm² de área de aço por metro de laje. Portanto, para o cálculo do reforço com fibra de carbono tem-se a área de aço $A_s = 1,91\text{cm}^2$ para ser usado na verificação da capacidade resistente ao momento fletor da laje que não possui armadura de compressão e será reforçada com fibra de carbono, utilizando a seguinte equação:

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot X}{2}\right) + \Psi_f \cdot A_f \cdot f_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot X}{2}\right) \quad \text{eq (n. 35)}$$

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.

β_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.

Ψ_f : Coeficiente adicional de redução da resistência do elemento de fibra de carbono, no valor de 0,85.

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.

Portanto, a equação 35 não considera as deformações existentes da peça antes da aplicação da fibra, ou seja, para sua eficácia, é necessário o escoramento de toda a estrutura para a aplicação da fibra, garantindo assim que, no momento da aplicação do reforço, a estrutura não apresente nenhuma flecha.

É conferida, inicialmente, a capacidade resistente da laje armada com 1,91 cm²/m considerando uma faixa de 1,0 m através da equação acima de numero 35. Com a deformação na linha de reforço e o conhecimento das propriedades das fibras a serem empregadas como reforço da laje é possível calcular a área necessária de reforço para atender a solicitação presente na estrutura.

$$M_{rd1} = (1,91 * 10^{-4}) * \frac{500000}{1,15} * (0,09 - \frac{0,8*0,0057}{2}) \quad \text{eq (n. 36)}$$

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

Portanto, a laje terá que resistir no mínimo o esforço característico de 7,61 KNm fornecido pela modelagem com elementos finitos, feito pelo software, que será necessário ter capacidade resistente de calculo mínimo conforme equação seguinte:

$$M_{Rd} = 7,61 * 1,4 \rightarrow M_{Rd} = 10,65 \text{ KNm}$$

Considerando as resistências máximas à tração de ambos os produtos, tem-se que:

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

Substituindo os valores na Equação 35:

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

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

Agora que foi calculado a área de reforço, deverá ser calculado a largura da manta de fibra a ser utilizado, através da equação seguinte:

$$A_f = t * l \quad \text{eq (n. 37)}$$

Sendo que:

A_f : Área do reforço com CFRP;
 t : Espessura nominal do CFRP utilizado;
 l : Largura do reforço.

Para este reforço foi aplicado o CFRP de referencia CF 130, cuja espessura nominal é de 0,165mm por lâmina. Assim sendo que a largura será:

$$A_f = t * l$$

$$8,85 = 0,165 * l \rightarrow l = 8,85 / 0,165$$

$$l = 53,64 \text{ mm, ou } 5,4 \text{ cm podendo ser arredondado para } 5,5 \text{ cm por}$$

segurança e garantia do corte.

Portanto, o reforço a ser aplicado será composto por apenas uma camada de 5,5 cm com fibra de espessura de 0,165mm. Vale ressaltar que se a área total necessária for o dobro da área atendida pela fibra considerando a largura calculada, então será utilizada duas camadas, e assim sucessivamente.

Conforme características apresentadas sobre o CFRP, cuja CF-130 com largura de 60cm o rolo, e o CF -160 com largura de 50cm, sendo estas as larguras máximas para utilização.

Obedecendo a Norma NBR 6118:2014, o posicionamento de reforço para aberturas em lajes, deve ser colocado ao redor da abertura nos sentidos transversais e longitudinais, tendo como objetivos absover os esforços gerados pela abertura, e este método deverá ser para qualquer tipo de material a ser usado, seja armadura, chapa ou fibras em geral. Como demonstração da aplicação, tem-se um exemplo de reforço com fibra aplicado na abertura de uma laje (Figura 27).

Figura 27 - 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.

$$A_{f,l} = 2 * (l * a_x) + 2 * (l * a_y) \quad \text{eq (n. 38)}$$

Sendo que:

a_x : Comprimento da abertura no eixo x;

a_y : Comprimento da abertura no eixo y.

Para a abertura da laje estudada, como foi utilizada uma camada em cada lateral calcula-se a área total do reforço ao substituir a equação com as devidas medidas.

$$A_{f,l} = 2 * (5,5 * 160) + 2 * (5,5 * 100)$$

$$A_{f,l} = 2860 \text{ cm}^2 \text{ ou } 0,286\text{m}^2$$

6.7 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO Á FLEXÃO COM FIBRA DE CARBONO DE ACORDO COM ACI 440.2R - 02

O estudo e cálculo do reforço devem ser utilizados como base às dimensões, resistência, armadura e principalmente às características mecânicas do elemento a ser reforçado. Portanto, a resistência à tração do concreto é desprezada, onde sua deformação não deve ser maior do que 3% segundo as recomendações da ACI, ou 3,5% se dimensionado segundo a ABNT.

Para ser conhecido o nível de tensão da qual o reforço será submetido será necessário ter o conhecimento das tensões na superfície da estrutura, e conseqüentemente se conhece a deformação da fibra que será aderida. Para que se

possa estabelecer o nível de tensão com a qual o reforço irá trabalhar será preciso descontar a deformação pré-existente da deformação final. A fórmula seguinte mostra a deformação máxima permissível a se conhecer.

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad \text{eq (n.39)}$$

Onde temos:

ε_b – deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo;

ε_{bi} – deformação pré-existente quando da instalação do reforço de fibra de carbono.

Quando o controle da ruptura ocorre pelo esmagamento do concreto, pode-se utilizar o bloco de tensões proposto por Whitney sem alterações, com profundidade de $0,85c$ para concretos de até $27,5\text{MPa}$ (ACI 318 – item 10.2.7.1). Para concreto acima de $27,5\text{MPa}$ o valor de β_1 deve ser diminuído de $0,05$ para cada $6,9\text{MPa}$ de acréscimo de resistência, nunca podendo ser menor do que $0,65$.

Quando o controle da ruptura for determinado pela delaminação do cobrimento do concreto ou pelo sistema composto, o bloco de tensões de compressão de Whitney fornece resultados com valores mais exatos com a utilização do valor de α_1 , obtido pela equação abaixo:

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3(\varepsilon'c)^2 \cdot \gamma_1} \quad \text{eq (n. 40)}$$

Sendo que:

$$\varepsilon'c = 1,71 \frac{f'_c}{E_c} \quad \text{eq (n. 41)}$$

$$\gamma_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c f'_c - \varepsilon_c^2}{6 \cdot \varepsilon_c f'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad \text{eq (n. 42)}$$

6.7.1 Determinação do momento resistente do reforço

O momento resistente de uma estrutura de concreto armado reforçada com fibra de carbono é constituído dos seguintes esforços:

FC – resultante da seção comprimida do concreto

$F'S$ – resultante da seção comprimida da armadura

FS – resultante da seção tracionada da armadura

Ff – resultante da seção tracionada de fibra de carbono

A capacidade resistente ao momento fletor pode ser expressa por meio da equação seguinte:

$$M_n = A_s \cdot A_f \left(d - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \left(\frac{\beta_{1,c}}{2} - d' \right) \quad \text{eq (n. 43)}$$

Sendo:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s < f_y \quad \text{eq (n. 44)}$$

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' < f_y \quad \text{eq (n. 45)}$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_c, \leq E_f \varepsilon_{fe} \quad \text{eq (n. 46)}$$

ψ – coeficiente adicional de redução com valor 0,85.

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad \text{eq (n.47)}$$

$$F_s' = A_s' \cdot f_s' \quad \text{eq (n. 48)}$$

$$F_f = A_f \cdot f_{fe} \quad \text{eq (n.49)}$$

$$F_c = \alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_{1,c} \quad \text{eq (n. 50)}$$

Reescrevendo a equação de número 43, ficará assim:

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + F_s' \left(\frac{\beta_{1,c}}{2} - d' \right) \quad \text{eq (n. 51)}$$

Caso não ache armadura para compressão essa equação poderá ser simplificada ficando com a seguinte formula:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) \quad \text{eq (n. 52)}$$

ou reduzida para,

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) \quad \text{eq (n. 53)}$$

Onde:

$$F_f = A_f \cdot f_{fe} \quad \text{eq (n. 54)}$$

$$f_{fe} = \varepsilon_f \cdot E_f = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) E_f \quad \text{eq (n. 55)}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) \quad \text{eq (n. 56)}$$

$$f_{fe} = \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] E_f \quad \text{eq (n. 57)}$$

$$F_f = A_f \cdot E_f \left[\varepsilon_c \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \quad \text{eq (n. 58)}$$

Portanto, o equilíbrio das forças será calculado por meio das tensões dos materiais constituintes. Mas para isto, este equilíbrio interno das forças só será satisfeito, caso seja obedecida a seguinte equação:

$$C = \frac{F_s + F_f}{F_c + F_s'} \quad \text{eq (n. 59)}$$

Com isto se consegue encontrar a profundidade da linha neutra por meio da equação de número 58, usando a equação acima de número 59, que irá estabelecer o equilíbrio de força e compatibilidade das devidas deformações.

Vale ressaltar que pode acontecer do concreto não poder absorver os esforços atuantes nas fibras, o que irá acontecer o descolamento do sistema aplicado. Para prevenir o acontecimento deste fato é introduzido uma limitação ao nível de deformação do sistema. (ACI Committee 440- item 9.2.1) por meio das equações abaixo, determina o coeficiente (K_m), estabelecido em função da cola:

$$K_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{fcu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}}{360.000} \right) \leq 0,90 \quad \text{quando, } n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} \leq 180.000 \quad \text{eq (n. 60)}$$

$$K_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{fcu}} \left(1 - \frac{90}{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}} \right) \leq 0,90 \quad \text{quando, } n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} > 180.000 \quad \text{eq (nº 61)}$$

Sabendo que:

- n - nº de camadas do reforço CFC
- E_{fc} - módulo de elasticidade do CFC (Mpa)
- t_{fc} - espessura de uma camada do sistema (mm)
- ε_{fcu} - deformação de ruptura do reforço com CFC (mm/mm)

Multiplicação do coeficiente (K_m) pela deformação de ruptura, definindo assim a limitação de deformação para que não ocorra o descolamento do sistema CFC. O número de camadas (n) é o número de lâmina de reforço á flexão onde a resistência ao momento fletor esteja sendo considerado. Este descolamento tem mais disposição conforme aumenta a espessura dos laminados. Portanto, conforme a espessura aumenta mais rigorosa deve ser as deformações máximas admissíveis. Para os laminados com $n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc} > 180.000 \text{N/mm}$ o coeficiente (K_m) limita a força a ser desenvolvida em oposição a deformação. Este coeficiente (k_m) é baseado em tendências observadas em projetos com sistemas compósitos externos, enquanto não acontece estudos mais elaborados, ACI recomenda o uso das equações acima de números 60 e 61.

Segundo a ACI Committee (item 3.4.1) a relação entre a resistência inicial até cerca de 50 anos é de 0,91. As fibras também são pouco sensíveis a carregamentos que podem gerar falhas por fadiga, e são pouco afetadas pelo meio ambiente, exceto caos em que a resina ou a interface fibra/resina seja degradada.

Para que seja evitada a ruptura por fluência deve haver a verificação durante a elaboração do projeto, fazendo com que os níveis de tensão permaneçam

dentro do limite elástico. É recomendado pela ACI Committee (item 9.5.1) que seja estabelecido o nível de tensão atuante a partir da seguinte equação:

$$f_{fc,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_{fc}}{E_s} \right) \frac{h-kd}{d-kd} - \xi_{bi} * E_{fc} \quad \text{eq (n. 62)}$$

Para garantir um coeficiente de segurança adequado, as tensões de longa duração devem ser limitadas pela equação seguinte de número (63), já que a equação anterior fornece um nível de tensão de um momento (M_s).

$$F_{fc,s} \geq f_{fc,s} \quad \text{eq (n. 63)}$$

A ACI 440 Committee, sugere a tensão limite para fluência adotada seja:

$$F_{fc,s} = 0,55f_{cu} \quad \text{eq (n. 64)}$$

Para as estruturas sujeitas a fadiga, deve ser utilizado a equação 64, sendo que o momento (M_s), igual ao de todas as cargas de longa duração acrescido do carregamento que gera a fadiga.

Quando se tem a necessidade de reforço em uma laje, deve-se fazer um estudo do local e ver mediante característica do local e da laje, qual melhor técnica a ser adotada. No quadro 3 se recomenda a escolha do reforço conforme o tipo da laje, muito embora somente com o estudo do local será escolhido a técnica ideal a ser aplicada.

Quadro 3 - Recomendações para reforço de lajes

MÉTODOS DE REFORÇOS RECOMENDADOS PARA LAJES				
Tipos de Lajes	Colocação de viga em concreto armado para apoio	Colocação de Perfil metálico como viga de apoio	Fixação de chapa metálica - resina epóxi e bucha expansiva	Fixação de manta em fibra de Carbono
Laje Maciça	Recomendado	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Laje Nervurada	Recomendado	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Laje Cogumelo	Não recomendado	Não recomendado	Recomendado	Recomendado
Laje Pré-moldada	Recomendado	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Laje Trelaçada	Recomendado	Recomendado	Recomendado	Recomendado
Laje Alveolares	Não recomendado	Não recomendado	Recomendado	Recomendado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme observa-se nos dados do quadro, a laje maciça é recomendada para receber qualquer tipo de reforço, uma vez que sua superfície inferior permite um contato uniforme e por completo do elemento estrutural com a área do outro elemento aderido.

A laje nervurada poderá receber qualquer tipo de reforço, mas deve-se evitar o reforço por viga de concreto armado, principalmente por um grande aumento do peso colocado na estrutura existente, na qual não foi dimensionado.

Reforço de laje cogumelo será recomendado apenas os reforços com chapa e fibra, pois esta geralmente é laje que não está apoiada em viga e sim em pilares. Colocar um elemento como uma viga seja de concreto ou perfil metálico irá descaracterizar a estrutura tirando sua principal função que é de não ter viga.

As lajes pré-moldadas ou trelaçadas podem receber qualquer tipo de reforço, no entanto para isto acontecer não deverá ter reboco na superfície inferior. Caso venha a ter é recomendado o uso de viga, seja de concreto armado ou de perfil metálico, pois outro tipo de reboco necessitaria a retirada do reboco para que o reforço seja diretamente nas vigotas.

Por ultimo tem-se as lajes alveolares, das quais são lajes premoldadas com grandes extensões, por isso não é recomendado o uso de perfil metálico e muito menos viga de concreto armado. Além de precisar ser muito robusta, elevaria o peso da estrutura em grande quantidade tornando inviável por medida de segurança.

Vale ressaltar que as chapas e manta de fibra de carbono possuem peso muito pequeno, esse peso é desconsiderado, uma vez que não influencia na capacidade de resistência da estrutura. Este deve ser um dos principais fatores na escolha de qualquer tipo reforço, uma vez que estará sendo lançado uma carga a mais na qual a estrutura de apoio destas lajes não foram calculadas, ou seja, as vigas e pilares.

Evidente que esta recomendação é uma sugestão baseada nas características de cada tipo de laje, sua escolha final será baseada numa análise com critérios que vão desde o planejamento, execução, segurança e os custos referente ao processo como um todo.

7 CONCLUSÃO

Diante do exposto observa-se que são muitos os problemas que ocorrem nas estruturas de concreto armado, tendo como referência as lajes, onde são as mais variadas necessidades de reforço. A correta escolha da técnica a ser aplicada no reforço ou mesmo na recuperação estrutural é que vai garantir o sucesso do trabalho. Seja, na qualidade do serviço, na alteração do projeto original ou não, segurança na execução sem parada das atividades do ambiente, e por fim os custos.

Para reforço da laje através da colocação de viga na parte inferior, além da alteração da estrutura, esta demora até 28 dias para retirada total de escoramento e sua cura. Na colocação de perfis metálicos tem-se um trabalho rápido, mas também resulta na alteração da estrutura. No entanto perde-se menos tempo na execução quando comparado com a de concreto armado.

Já o reforço com chapas coladas permite uma melhoria significativa da capacidade de resistência podendo chegar até 50%, sem interrupção do uso da estrutura e não demolição dos elementos estruturais, conservando assim o projeto original. Apresenta menor custo entre os demais sistemas de reforços, sendo que tanto pode ser aplicado em laje como em vigas.

A técnica de reforço com fibra de carbono em estruturas de concreto é uma das mais utilizadas atualmente devido esta atingir 100% de sua resistência em apenas 7 dias, onde o concreto precisa de 30 dias. Com isso o uso desta técnica é capaz de reduzir entre 60% e 70% o tempo da realização de uma obra de reforço sem alterar sua estrutura a exemplo do uso das chapas.

Mediante as características apresentadas referentes a cada tipo de reforço, e analisando a região na qual a estrutura se encontra e a geometria da estrutura a ser reforçada, a facilidade do material junto a mão de obra na região, a finalidade do reforço e os custos totais são fatores que determinarão o melhor reforço a ser aplicado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÃO, F. X.; HEMERLY, A. C. **Concreto Armado**: cálculo prático e econômico. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for the design and construction of externally bonded systems for strengthening concrete structures. ACI: 2R, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de concreto. Rio de Janeiro: Procedimento, 2014.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do Concreto Armado**. São Paulo: UNESP, 2006.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CARVALHO, R. C.; FILHO FIGUEIREDO, J. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. Ed. SC: EDUFSCAR, 2014.

FERNANDES, R. M. **Recuperação estrutural como solução estratégica para prédios antigos**. 01 fev. 2012. Artigonal: Diretório de Artigos Gratuitos. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/ciencias-artigos/recuperacao-estruturalcomo-solucao-estrategia-para-predios-antigos-5623149.html>>. Acesso em 24 set. 2021.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. 2007. 267f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HIGASHI, M. M. Y. **Reforço de estrutura de betão armado com chapas de aço**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2016.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas**: módulo 2. 2002. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2002.

LIMA, L. C. C.; MACCHERONI, F. P. **Estudo comparativo entre sistemas de reforço estrutural para vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**.

2015. 168 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** São Paulo: Pini, 2010.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática.** São Paulo: Pini, 2015.

MATHEUS, M. O. B. **Análise de reforço de lajes em concreto armado através de comparativo técnico econômico para diferentes alternativas de reforço estrutural com materiais compostos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2018.

MENDES, R. T. **Reforço de bordas de aberturas em lajes de concreto armado utilizando fibra de carbono.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/28738/1/2017_tcc_rtmendes.pdf. Acesso em 02 de nov.2021.

PINHEIRO, L. M; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P.; CATOIA T.; CATOIA, B. **Estruturas de Concreto.** Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo: EESC 2010.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.

TOMAZ, R. A.; SOARES, F. L.; BARBOSA, P. H. M. **Reforço estrutural de lajes de concreto armado com fibra de carbono.** Congresso Brasileiro de Ponte e Estruturas, v. 7, 2014.

ZUCCHI, F. L. Técnica para reforço de elementos estruturais. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015.

ZUCCHI, F. L.; **Técnica para reforço de elementos estruturais.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015.