



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL



**REFORÇO DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO USANDO FIBRAS DE  
CARBONO: ESTUDO DE CASO**

Maceió

2020

PRISCILA DUARTE DE OLIVEIRA

**REFORÇO DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO USANDO FIBRAS DE  
CARBONO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques

Maceió

2020



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 13:45 horas do dia 19 de FEVEREIRO de 2020, na sala DE REUNIÃO 1/LCCV do Centro de Tecnologia, reuniu-se a banca examinadora para avaliação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do(a) aluno(a) PRISCILA DUARTE DE OLIVEIRA, sob o título "REFORÇO DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADO USANDO FIBRAS DE CARBONO: ESTUDO DE CASO",

composta pelos seguintes participantes:

Orientador: Prof(a) (A<sub>1</sub>) SEVERINO PEREIRA CAVALCANTI MARQUES,  
Co-orientador Prof(a) —————,  
Prof(a) Avaliador(a) (A<sub>2</sub>) EDUARDO TOLEDO DE LIMA JÚNIOR,  
Prof(a) Avaliador(a) (A<sub>3</sub>) EVANDRO FONSECA SARMENTO.

A apresentação oral do aluno foi realizada em 25 minutos, findos os quais foi iniciado o debate, perfazendo um tempo total de defesa de 1 hora (s) e 20 minutos.

O aluno obteve média final 9,0 (NOVE INTEIROS)

Abaixo, assinatura do orientador, seguida dos membros da banca, de acordo com a ordem listada acima, todos seguidos da respectiva nota, a assinatura do aluno e a assinatura do Coordenador do TCC.

Prof(a) (A<sub>1</sub>) Severino Pereira Cavalcanti Marques, nota final 9,0  
Prof(a) (A<sub>2</sub>) Eduardo Toledo de Lima Júnior, nota final 9,0  
Prof(a) (A<sub>3</sub>) Evandro Fonseca Sarmiento, nota final 9,0

Aluno: Priscila Duarte de Oliveira

Coordenador do TCC: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Selma e Gelmir, por todo incentivo, paciência e auxílio durante essa longa jornada. Sem vocês nada disso seria possível, obrigada por acreditarem nesse sonho e por fazerem de tudo para que ele fosse adiante. Vocês são minha maior inspiração de vida!

À minha irmã, Pâmela, por todo o companheirismo, por ser tão maravilhosa e sempre estar disponível nos momentos em que eu mais necessitei. Por me tornar mais leve, nos momentos em que precisei de alguém para compartilhar minhas angústias.

Ao meu amado marido, Thiago, por sempre acreditar em mim, me incentivar e por estar sempre presente, compartilhando a vida comigo. Você me possibilitou traçar um caminho diferente e a entender que as dificuldades só nos fortalecem cada vez mais.

À minha pequena princesa, Malu, que me apresentou um mundo que até então eu não conhecia, e me ensinou que, apesar das dificuldades, é possível conciliar um curso tão difícil com a tarefa de ser mãe. Seu sorriso me fortalece!

Agradeço aos meus avós, Maria Luiza (*in memoriam*), Gerson (*in memoriam*), Manoel (*in memoriam*) e Maria de Lourdes. A todos tenho enorme gratidão, mas, meu agradecimento mais que especial é para o meu querido vô Manoel, pelos seus conselhos, encorajamentos e pelos longos diálogos que tive o prazer de ter, dos quais trago muita saudade.

Um grande agradecimento a todos meus professores pela dedicação, são os maiores responsáveis por minha formação. Um agradecimento especial aos professores: Flávio Barboza, Paulo César, Roberto dos Santos, Juliane Marques, Silvia Uchôa e Eduardo Toledo, mais que professores, verdadeiros amigos.

Quero agradecer especialmente ao meu orientador, Severino Marques, por ter compartilhado seus conhecimentos de maneira tão cuidadosa e com tanta dedicação. Tenho o maior prazer e felicidade por ter sido orientada por este profissional excelente e inspirador na elaboração do meu TCC.

A todos os funcionários do CTEC por todo apoio e agradáveis companhias.

Agradeço aos meus amigos da época do CEFET, pelo companheirismo e boas risadas que sempre demos juntos. Em especial aos lindos Ivan e Dani, mais que amigos, verdadeiros parceiros de vida. Sinto muita falta de vocês!

Agradeço aos meus colegas de trabalho, em especial à minha parceira Kátia e ao meu querido diretor Ernande, pela compreensão, amizade e paciência nos momentos em que eu precisei me ausentar do trabalho, ou nos momentos em que eu não estava tão tolerante.

A todos os colegas de classe que pude ter o prazer de estudar, compartilhar experiências e conhecimentos. Agradeço, especialmente, ao Alysson, Amanda e Jasmyn, é um prazer ter conhecido vocês e ter compartilhado tantos momentos bons e ruins durante essa jornada, me mostraram que as diferenças fortalecem a nossa amizade. Vocês são maravilhosos!

Por fim, não querendo esquecer ninguém, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram durante a graduação e às que contribuíram para a realização do meu trabalho e para a finalização desse ciclo na minha vida.

## RESUMO

OLIVEIRA, P. D. de. **Reforço de um pavimento de concreto armado usando fibras de carbono: estudo de caso.** Trabalho de conclusão de curso de graduação – Engenharia Civil – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2020.

O concreto armado é de inegável versatilidade, quanto à sua aplicação. Há casos em que devido à mudança de uso da estrutura, por exemplo, é necessário reforçá-la, para que esta suporte as novas solicitações de modo seguro. Nestes casos, os polímeros reforçados com fibras (PRF) têm sido bastante aplicados, sendo competitivos como elementos de reforço, principalmente os compostos que usam a fibra de carbono. Isso se dá, dentre outros motivos, devido ao fato do compósito apresentar baixo peso específico para elevada resistência, facilidade e rapidez de aplicação, segurança e acessibilidade. Este trabalho apresenta um breve estudo da literatura existente sobre o composto de fibra de carbono, técnicas de aplicação, descrição do material, propriedades, e apresenta o roteiro de cálculo para o dimensionamento do reforço de vigas e lajes de um pavimento de concreto armado, baseado nas prescrições do ACI 440.2R, ABNT NBR 6118 e NBR 6120. Por fim, são exibidos os resultados para o dimensionamento do pavimento a ser reforçado com fibra de carbono e ilustrações representando como as fibras deverão ser aplicadas.

**Palavras-chave:** reforço estrutural, fibra de carbono, pavimento de concreto, estudo de caso.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, P. D. de. **Reinforcement of a reinforced concrete floor using carbon fibers: a case study.** Graduation course work – Civil Engineering – federal University of Alagoas, Maceió. 2020.

Reinforced concrete is undeniably versatile in terms of its application. There are cases in which, due to the change in use of the structure, for example, it is necessary to reinforce it, so that it can support additional loading in a safe manner. In these cases, fiber reinforced polymers (FRP) have been widely applied, being competitive as reinforcement elements, especially compounds that use carbon fiber. This is due, among other reasons, to the fact that this fiber has a low specific weight for high strength, ease and speed of application, safety and accessibility. This work presents a brief study of the existing literature on the carbon fiber compound, application techniques, description of the material, properties, and presents the calculation procedure for the design of the reinforcement of beams and slabs for a reinforced concrete floor, based on the prescriptions of ACI 440.2R, ABNT NBR 6118 and NBR 6120. Finally, the results for the dimensioning of the floor to be reinforced with carbon fiber and illustrations representing how the fibers should be applied are displayed.

**Keywords:** structural reinforcement, carbon fiber, concrete pavement, case study.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo estrutural do pavimento analisado. ....	21
Figura 2 - Compósito de fibra de carbono. ....	23
Figura 3 - Ampliação em microscópio eletrônico da matriz polimérica com as fibras de carbono. ....	24
Figura 4 - Sistemas de reforço com fibras de carbono. ....	25
Figura 5 - Diagrama tensão-deformação do PRFC. ....	27
Figura 6 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono. .	29
Figura 7 - Arredondamento de quina com politriz. ....	30
Figura 8 - Conformação dos cantos internos. ....	31
Figura 9 - Ferramenta de aplicação de adesivo sobre a lâmina. ....	33
Figura 10 - Modos de ruptura de uma viga reforçada com PRF. ....	35
Figura 11 - Esquema da viga com reforço. ....	37
Figura 12 - Pontos de terminação do reforço. ....	41
Figura 13 - Configurações possíveis ao cisalhamento. ....	42
Figura 14 - Exemplos de distribuição do reforço com PRFC. ....	43
Figura 15 - Orientação e distribuição das fibras de PRFC. ....	44
Figura 16 - Indicação de largura, espaçamento e inclinação da fibra de carbono. ....	46
Figura 17 - Reforço com PRFC em duas direções. ....	48
Figura 18 - Reforço com PRFC em uma direção. ....	48
Figura 19 - Representação dos tipos de apoios das lajes. ....	50
Figura 20 - representação da vinculação das lajes. ....	51
Figura 21 - Distribuição das cargas das lajes nas vigas. ....	52
Figura 22 - Vigas 01, 03, 04 e 05 com carregamento calculado para uso residencial. ....	57
Figura 23 - Vigas 01, 03 04 e 05 com carregamento calculado para fins esportivos. ....	57
Figura 24- Diagrama de momento fletor das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de uso residencial. ....	58
Figura 25 - Diagrama de momento fletor das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de fins esportivos. ....	58
Figura 26 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de uso residencial. ....	59

Figura 27 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de fins esportivos.....	59
Figura 28 - Vigas 02 e 06 carregamento calculado para uso residencial. ....	60
Figura 29 - Vigas 02 e 06 com carregamento calculado para fins esportivos. ....	60
Figura 30 - Diagrama de momento fletor das vigas 02 e 06 para o carregamento de uso residencial.....	61
Figura 31 - Diagrama de momento fletor das vigas 02 e 06 para o carregamento de fins esportivos.....	61
Figura 32 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 02 e 06 para o carregamento de uso residencial.....	62
Figura 33 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 02 e 06 para o carregamento de fins esportivos.....	62
Figura 34 - Seção transversal das vigas (dimensões em metro). ....	65
Figura 35 - Representação do reforço à flexão nas vigas. ....	68
Figura 36 - Representação do reforço positivo dimensionado para as lajes.....	69
Figura 37 - Representação do reforço negativo dimensionado para as lajes.....	70
Figura 38 - Representação do reforço ao cisalhamento das vigas 1, 3, 4 e 5.....	73
Figura 39 - Representação do reforço ao cisalhamento das vigas 2 e 6.....	73
Figura 40 - Detalhe das tiras de reforço ao cisalhamento.....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos sistemas de fibra de carbono curados <i>in-situ</i> . .....	26
Quadro 2 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias à flexão para as vigas 01, 03, 04 e 05. ....	63
Quadro 3 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias ao cisalhamento para as vigas 01,03, 04 e 05. ....	63
Quadro 4 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias à flexão para as vigas 02 e 06. ....	63
Quadro 5 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias ao cisalhamento para as vigas 02 e 06. ....	63
Quadro 6 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias para as lajes. ....	64
Quadro 7 - Linha neutra e momento de inércia das vigas para o estádio 2. ....	65
Quadro 8 - Deformações iniciais calculadas para as vigas. ....	65
Quadro 9 - Dados para dimensionamento do PRFC para as vigas. ....	66
Quadro 10 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 1, 3, 4 e 5. ....	66
Quadro 11 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 1, 3, 4 e 5, com o momento positivo compatibilizado. ....	67
Quadro 12- Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 2 e 6. ....	67
Quadro 13 - Área de armadura das lajes para dimensionamento do reforço. ....	68
Quadro 14 - Deformações iniciais calculadas para as lajes. ....	68
Quadro 15 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas lajes. ....	69
Quadro 16 - Verificação da capacidade resistente das diagonais comprimidas. ....	71
Quadro 17 - Capacidade resistente relativa à seção reforçada. ....	71
Quadro 18 - Parâmetros para dimensionamento à cortante. ....	72
Quadro 19 - Resultado do dimensionamento do esforço cortante. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas dos PRFC à tração.....	27
Tabela 2 - Coeficiente de dilatação térmica das fibras de carbono. ....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABECE – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

*fib* – Federação Internacional do Concreto

JCI – Japanese Concrete Institute

JSCE – Japanese Society of Civil Engineers

PRF – Polímeros Reforçados com Fibras

PRFC – Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_f$  – Área de PRFC na seção transversal da viga.

$A_{f,calc}$  – Área calculada de PRFC na seção transversal da viga.

$A_{f,ef}$  – Área efetiva de PRFC na seção transversal da viga.

$A_s$  – Área da seção transversal das armaduras de tração da viga.

$A_{s,ef}$  – Área efetiva da seção transversal das armaduras de tração da viga.

$A'_s$  – Área da seção transversal das armaduras de compressão da viga.

$A_{sw}$  – Área da seção transversal dos estribos.

$b_f$  – Largura do reforço.

$b_w$  – Largura da viga.

$d$  – Altura útil da viga.

$d''$  – Distância da face comprimida à armadura de compressão na viga.

$d_f$  – Altura útil do reforço ao cisalhamento.

$d_{fe}$  – Comprimento efetivamente aderido do PRFC no reforço a cisalhamento.

$D_d$  – Resultante da seção comprimida do concreto.

$E_f$  – Módulo de elasticidade do PRFC à tração.

$E_s$  – Módulo de elasticidade do aço.

$f_{cd}$  – Resistência de cálculo à compressão do concreto.

$f_{ck}$  – Resistência característica à compressão do concreto.

$f_{ctk,inf}$  – Valor mínimo para resistência à tração direta do concreto armado.

$F_d$  – Força atuante no PRFC da viga.

$f_{fd}$  – Tensão máxima que deve ser atingida pelo PRFC no reforço ao cisalhamento.

$f_{fu}$  – Resistência do PRFC à tração.

$f_{ywd}$  – Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura transversal.

$f_{yd}$  – Resistência de cálculo ao escoamento do aço utilizado na armadura de flexão das vigas.

$h$  – Altura da viga.

$I_{II}$  – Momento de inércia para o estágio 2.

$k_1$  – Fator de forma para a tensão do concreto confinado.

$k_2$  – Fator de forma para a deformação específica do concreto confinado.

$k_v$  – Coeficiente de redução da deformação do PRFC no reforço ao cisalhamento.

$l_x$  – Menor largura da laje.

$l_y$  – Maior largura da laje.

$l^*$  – Menor valor entre  $l_x$  e  $l_y$ .

$L$  – Comprimento de ancoragem utilizado.

$L_e$  – Comprimento efetivo de ancoragem do reforço à flexão de vigas.

$L_{ew}$  – Comprimento efetivo de ancoragem do reforço ao cisalhamento.

$M_{d+}$  – Momento positivo máximo resistente.

$M_{d-}$  – Momento negativo máximo resistente.

$M_{g+}$  – Momento positivo resistente para cargas permanentes.

$M_{g-}$  – Momento negativo resistente para cargas permanentes.

$n$  – Número de camadas do PRFC.

$s$  – Espaçamento entre estribos.

$s_f$  – Espaçamento das tiras de reforço ao cisalhamento.

$T_G$  – Temperatura de transição vítrea.

$t_f$  – Espessura do PRFC.

$t_{ft}$  – Espessura do reforço à flexão de vigas.

$V_c$  – Parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo de treliça.

$V_{fc}$  – Parcela de força cortante resistida pelo reforço.

$V_{Rd2}$  – Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto.

$V_{Rd3}$  – Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal.

$V_{sd}$  – Força cortante solicitante de cálculo.

$V_{sw}$  – Parcela de força cortante resistida pela armadura transversal.

$x$  – Profundidade efetiva da linha neutra da viga.

$x_{II}$  – Profundidade da linha neutra para o estágio 2.

$Z_d$  – Força atuante na armadura de tração da viga.

$Z'_d$  – Força atuante na armadura de compressão da viga.

$w_f$  – Largura das tiras de reforço ao cisalhamento.

$\alpha_c$  – Parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão.

$\epsilon_{bi}$  – Deformação específica do concreto na face tracionada da viga no instante de aplicação do reforço.

$\epsilon_{cd}$  – Deformação específica do concreto na face comprimida da viga.

$\epsilon_{cu}$  – Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.

$\epsilon_{c2}$  – Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico.

$\epsilon_f$  – Deformação específica no PRF.

$\epsilon_{fe}$  – Deformação específica efetiva do PRF.

$\epsilon_{fu}$  – Deformação específica de ruptura do PRFC à tração.

$\epsilon_{uk}$  – Deformação de tração na ruptura do aço.

$\epsilon_{sd}$  – Deformação específica da armadura de tração da viga.

$\epsilon'_{sd}$  – Deformação específica da armadura de compressão da viga.

$\sigma_{cd}$  – Tensão de compressão do concreto.

$\sigma_f$  – Tensão no PRF.

$\sigma_{f,m\acute{a}x}$  – Tensão máxima no PRF

$\sigma_{sd}$  – Tensão atuante na armadura de tração da viga.

$\sigma'_{sd}$  – Tensão atuante na armadura de compressão da viga.

$\gamma_c$  – Coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

$\lambda$  – Relação entre a profundidade do diagrama retangular de compressão equivalente e a altura da linha neutra.

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	18
1.1 Comentários iniciais .....	18
1.2 Objetivo geral .....	19
1.3 Justificativa e delimitação do trabalho .....	20
1.4 Descrição do problema .....	20
1.5 Delineamento do trabalho .....	21
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FIBRAS DE CARBONO .....	23
2.1 Considerações iniciais .....	23
2.2 Propriedades mecânicas .....	26
2.3 Aspectos construtivos do sistema .....	28
2.3.1 Recuperação do substrato de concreto .....	29
2.3.2 Preparação da superfície .....	30
2.3.3 Aplicação de primer .....	31
2.3.4 Aplicação do compósito .....	31
3 REFORÇO DE VIGAS E LAJES .....	34
3.1 Dimensionamento de reforço em vigas .....	34
3.1.1 Dimensionamento à flexão .....	34
3.1.2 Dimensionamento ao cisalhamento .....	42
3.2 Dimensionamento de reforço em lajes .....	47
4 METODOLOGIA .....	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	50
5.1 Considerações iniciais para dimensionamento do reforço .....	50
5.2 Ações atuantes na estrutura .....	52
5.3 Diagramas de momento fletor e de força cortante das vigas .....	56
5.4 Dimensionamento do reforço à flexão .....	64
5.4.1 Vigas .....	64
5.4.2 Lajes .....	68
5.5 Dimensionamento do reforço ao cisalhamento .....	71

5.5.1 Vigas .....	71
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
REFERÊNCIAS .....	76

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Comentários iniciais

A versatilidade do concreto armado frente à sua aplicação é de inegável importância, e a elaboração de um projeto estrutural exige, além de conhecimento técnico, um bom planejamento e execução para que sejam garantidos: bom desempenho funcional, segurança, durabilidade e economia, conforme apontam Adorno et al.(2015). Um fator importante e que contribui para uma maior durabilidade da estrutura é o uso adequado, já que, nos roteiros de cálculo são determinadas as cargas para as quais foi feito o dimensionamento; quando este uso é modificado faz-se necessária nova verificação dos esforços máximos resistidos pelas peças.

Nesta verificação, denominada diagnóstico (BEBER, 2003), quando há sobrecarga adicional significativa analisa-se se a estrutura é capaz de suportá-la sem que ocorram falhas. Quando, devido à carga adicional, for constatado que a estrutura pode atingir o estado limite último é necessário o dimensionamento do reforço, que será executado a fim de aumentar a capacidade portante (REIS *apud* ARAÚJO, 2014). Para o dimensionamento e execução do reforço, faz-se necessário o conhecimento total sobre o estado atual da estrutura, assim como, analisar os projetos e como estes foram executados.

A proposta de reabilitar tais estruturas, ou torná-las aptas a receber maiores sobrecargas é o que proporciona um uso possível e seguro. Entre os reforços que podem ser empregados, pode-se citar os métodos tradicionais que influenciam diretamente na estrutura – como a colagem de chapas metálicas, furação do concreto para ancoragem das barras, armaduras de complementação, adição de perfis metálicos e a protensão – e os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Segundo Arquez (2010) os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) têm se sobressaído em relação aos demais, por apresentarem segurança e acessibilidade. Essa notoriedade se dá basicamente devido à elevada resistência para um baixo peso específico, facilidade e rapidez de aplicação, elevada resistência à tração, corrosão e a ambientes agressivos.

No Brasil, devido à falta de uma norma técnica nacional para o dimensionamento do reforço de estruturas de concreto, utilizando esta tecnologia, são utilizadas como referência, conforme aponta Borges (2016), principalmente as normas técnicas americanas ACI 440R e ACI 440.2R, o boletim 14 da *fib*, e as normas japonesas JCI TC952 e JSCE 23; no entanto, nos estudos desenvolvidos no Brasil as mais usuais são: a norma americana ACI 440.2R e o

boletim 14 *dafib*. Ainda, segundo Borges (2016), em 2015 a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) estimulou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) à criação de uma norma técnica que preconize a aplicação de fibra de carbono em estruturas de concreto armado, mas, até o momento a norma ainda não foi criada.

Atualmente as fibras mais usadas nos PRF empregados na construção civil são as de carbono e de vidro. Comparando-se as fibras de carbono com as fibras de aramida e vidro, sabe-se que a fibra de carbono, além de ser a mais resistente, possui o maior módulo de elasticidade dentre as três, proporcionando boa rigidez ao sistema de reforço, além de ser a única com bom comportamento frente à fadiga (GARCEZ, 2007 *apud* ARAÚJO, 2014).

O custo da aplicação da técnica é bastante relativo e depende basicamente do material empregado, como o tipo de fibra e de resina. Em geral, quanto maior o módulo de elasticidade da fibra maior será o seu custo. Porém, apesar do custo da fibra ser superior ao dos materiais empregados nos métodos de reforço tradicionais, a diminuição do tempo de interdição, a facilidade de aplicação, além de ser não corrosivo, o que garante maior durabilidade e pouca ou nenhuma necessidade de manutenção, tornam este método bastante competitivo em relação aos demais.

As fibras de carbono, de acordo com Meneghetti et al. (2007), são as mais adequadas para utilização na maioria dos casos de reforço de estruturas de concreto, devido, principalmente, à sua resistência aos álcalis e por não estarem sujeitas à fadiga, como dito acima. Em seu estudo experimental Meneghetti et al. (2007) apresentam a verificação de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC, com incremento de carga de 25% a 45%, e como resultado obtiveram a comprovação da eficiência da aplicação da técnica, que proporcionou aumento de capacidade de carga dos elementos estudados em mais de 55%, principalmente quando foi feita a aplicação de mais de uma camada do reforço.

Este trabalho apresenta o dimensionamento do reforço de uma estrutura de concreto armado que inicialmente foi calculada para uso residencial e será submetida a mudança de uso, para fins esportivos, com isso, receberá sobrecarga adicional. São apresentadas as verificações e o dimensionamento do reforço para esta estrutura.

## 1.2 Objetivo geral

Dimensionar o reforço das vigas e lajes de uma estrutura de concreto armado submetida a uma sobrecarga adicional em decorrência da mudança de uso utilizando PRFC.

### 1.3 Justificativa e delimitação do trabalho

É bastante comum ocorrer mudança de uso nas estruturas, o que gera a necessidade de realizar uma nova avaliação, denominada diagnóstico, para que seja verificado se a estrutura é capaz de suportar a sobrecarga adicional sem que entre em colapso ou que ocorram falhas. Quando é verificada a necessidade de uma maior resistência, esta pode ser obtida realizando-se reforço na estrutura, neste trabalho é apresentado o dimensionamento do reforço utilizando PRFC.

O reforço com PRFC é uma técnica consolidada no exterior, principalmente em países desenvolvidos, e tem sido bastante usual no Brasil. Além de ser uma temática pertinente na Engenharia e apresentar bastante competitividade, os PRFC apresentam uma série de vantagens que viabilizam a sua escolha e aprofundamento da técnica, tais como: a facilidade de aplicação do produto, as mudanças mínimas na estrutura, a leveza, a não necessidade de escoramento para aplicação e de manutenções periódicas.

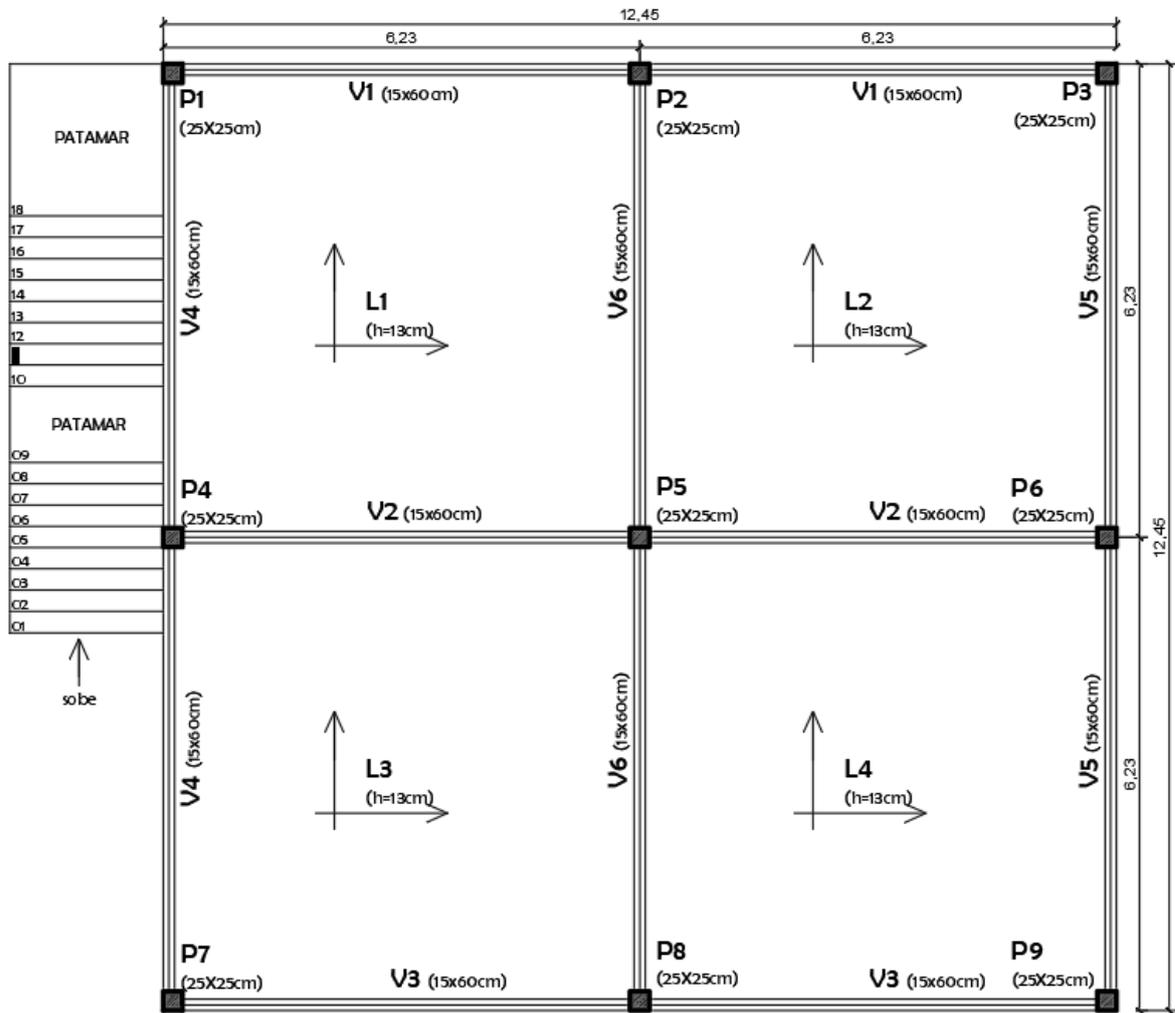
Para a concepção do diagnóstico da estrutura serão utilizadas as prescrições da NBR 6118 (2014), para as propriedades relativas aos materiais e coeficientes de segurança, e da NBR 6120 (1980), para a determinação das sobrecargas. As verificações serão realizadas com base nos conceitos de Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. As lajes serão verificadas a partir do método das áreas, também preconizado nas normas brasileiras. O dimensionamento do reforço e as suas propriedades serão determinados a partir das recomendações do ACI 440.2R-8(2017).

### 1.4 Descrição do problema

A edificação do pavimento a ser reforçado está localizada em uma área urbana, que, de acordo com a Tabela 6.1 da NBR 6118 (2014), está inserida na classe de agressividade ambiental II – Moderada. Nesse estudo o concreto adotado terá resistência característica  $f_{ck} = 25\text{MPa}$ . Serão utilizados aço CA – 50 para armadura de flexão e aço CA – 60 para armadura de cisalhamento.

A estrutura foi dimensionada inicialmente para uso residencial, com todas as vigas contendo alvenaria construída sobre elas; posteriormente, será modificado o uso da estrutura, para fins esportivos. Em consequência da mudança de uso, as vigas 02 e 06 terão a alvenaria construída sobre elas demolida. A figura 1, abaixo, ilustra o modelo estrutural analisado.

Figura 1 - Modelo estrutural do pavimento analisado.



Fonte: Autora, 2020.

Trata-se de um pavimento de planta baixa quadrada, cuja estrutura é composta por lajes maciças, vigas e pilares, todos de concreto armado. As dimensões dos elementos estruturais estão definidas na figura acima. Os pilares atendem às sobrecargas tanto do uso para fins residenciais, quanto para fins esportivos.

### 1.5 Delineamento do trabalho

Este trabalho estrutura-se através de 5 capítulos, nos quais a temática é abordada da seguinte forma:

No capítulo 2, que trata dos polímeros reforçados com fibras de carbono, são abordadas as características gerais do composto, técnicas de aplicação, propriedades mecânicas, constituição e classificação do material.

No capítulo 3, acerca do reforço de vigas e lajes, são tratadas questões normativas que envolvem o dimensionamento do reforço com PRFC. Apresenta o roteiro de cálculo para o dimensionamento à flexão e ao esforço cortante, e as verificações necessárias recomendadas pelas normas.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada no trabalho para o cumprimento dos objetivos apresentados. São exibidas as fontes de pesquisa, os parâmetros levados em consideração para o dimensionamento.

No capítulo 5, após toda a explanação sobre o compósito – características, aplicação e dimensionamento – são apresentados os resultados encontrados a partir do dimensionamento realizado.

## 2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FIBRAS DE CARBONO

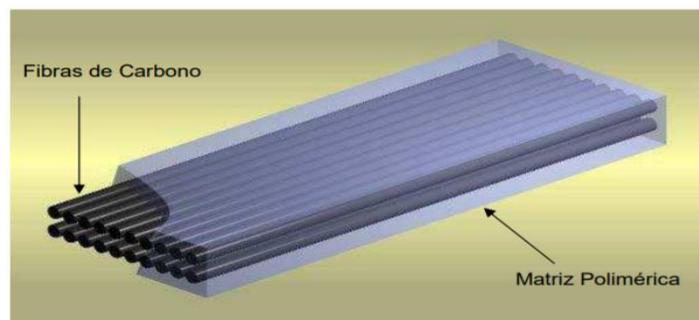
### 2.1 Considerações iniciais

Os materiais compósitos têm desempenhado papéis estruturais importantes no campo das engenharias militar, aeroespacial, náutica e automobilística desde 1940 (JUVANDES, 1996). O sucesso no uso de técnicas envolvendo esses materiais despertou interesse na engenharia civil, que passou a empregá-las como armaduras não metálicas tanto no dimensionamento de estruturas, quanto no reforço destas.

Os polímeros combinados com as fibras de carbono são apropriados para o reforço de estruturas de concreto devido ao alto desempenho mecânico das fibras de carbono, aumento da força e manutenção da seção transversal original da parte reforçada, de acordo com Souza e Ferrari (2012). De acordo com Souza e Ferrari (2012), o uso desses materiais merece destaque no Japão, aplicação relacionada aos problemas causados pelos terremotos; na Europa, na reabilitação de infraestrutura de patrimônios históricos; e na América do Norte, o foco é a durabilidade dos edifícios e reabilitação de pontes. Segundo Souza Filho (2007) a primeira aplicação de PRFC no Brasil aconteceu em 1998 em Belo Horizonte, Minas Gerais, no reforço do viaduto de Santa Teresa.

Os compósitos utilizados em reforços são constituídos essencialmente por dois elementos, conforme pode ser visto na figura 2: as fibras, que possuem elevada resistência e elevado módulo de elasticidade; e a matriz, que envolve as fibras proporcionando boa transferência de tensões no plano, além de formar uma proteção mecânica, à abrasão, à umidade, à oxidação, e à agentes agressivos de natureza química e biológica (ARAÚJO, 2014). Juntos, esses dois componentes possuem propriedades superiores em relação àquelas exibidas por eles individualmente (CURTY, 2009).

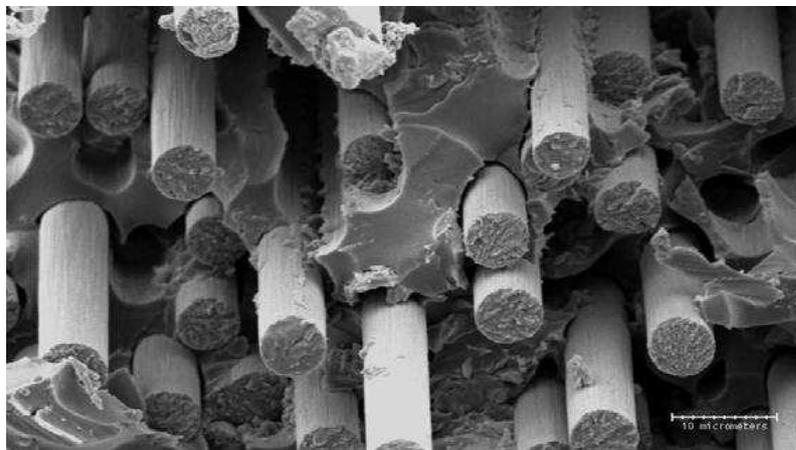
Figura 2 - Compósito de fibra de carbono.



Fonte: Curty, 2009.

De acordo com Silva Filho (2007), as matrizes utilizadas em polímeros reforçados são resinas termoplásticas ou termorrígidas, que devem apresentar concordância química e térmica com a fibra. Para o reforço de estruturas utiliza-se resinas termorrígidas, nas quais pode-se citar o poliéster, o éster-vinílico, o uretano metacrilato, o fenol e o epóxi. Sendo as resinas epóxi as mais utilizadas por apresentarem ótima aderência, durabilidade, compatibilidade com o concreto, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura (MACHADO, s/d), na figura abaixo é possível visualizar a ligação entre as fibras de carbono e a matriz polimérica.

Figura 3 - Ampliação em microscópio eletrônico da matriz polimérica com as fibras de carbono.



Fonte: Curty, 2009.

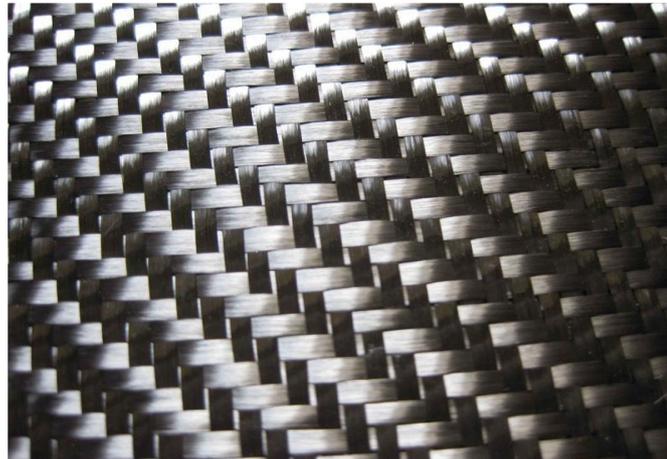
Araújo (2014) destaca em seu trabalho que existem fundamentalmente dois sistemas de PRFC comumente utilizados para reforço estrutural: os curados *in-situ* e os pré-fabricados. Nos sistemas curados *in-situ*, o fornecimento da matriz e da fibra é feito separadamente, sendo a impregnação realizada no momento da aplicação. Esse sistema é classificado como manta quando as fibras são dispostas unidirecionalmente, e como tecido, quando estão dispostas em várias direções, conforme pode ser visto nas figuras abaixo. Ainda segundo Araújo (2014), para os sistemas pré-fabricados fornecem a fibra já impregnada e curada, com várias formas, sendo o mais comum o laminado com espessuras entre 1,0 e 1,4mm.

Figura 4 - Sistemas de reforço com fibras de carbono.

a) Manta de fibra de carbono.



b) Tecido de fibra de carbono.



c) Laminado de fibra de carbono.



Fonte: Araújo, 2014.

Beber (2003) apresenta uma descrição sobre os sistemas citados acima, curados *in-situ*, de acordo com a orientação e estado das fibras, conforme pode ser vista a síntese no

quadro abaixo. Como unidirecional, o autor define que as fibras estão alinhadas em uma única direção; como bidirecional, as fibras estão alinhadas perpendicularmente nas duas direções, e como aleatória, as fibras estão distribuídas aleatoriamente nas várias direções num mesmo plano.

Quadro 1 - Descrição dos sistemas de fibra de carbono curados *in-situ*.

SISTEMA DE REFORÇO		DESCRIÇÃO	ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS	CONDIÇÃO
<b>MANTAS</b> ( <i>Sheets</i> )		Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção 200-300g/m <sup>2</sup>	Unidirecionais	Secas Pré-impregnadas
<b>TECIDOS</b>	<i>Woven roving</i> (ii)	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou faixa de fibras 600-800g/m <sup>2</sup>	Bidirecionais	Secos
	<i>Mat</i> (ii)	Espalhamento aleatório das fibras em uma esteira rolante que, depois são pulverizados com resina para adquirir consistência	Multidirecionais	Pré-impregnados
	<i>Clrth</i> (ii)	Fios contínuos tecidos por processo têxtil convencional 150-400g/m <sup>2</sup>	Uni, bi ou multidirecional	

Fonte: Beber, 2003.

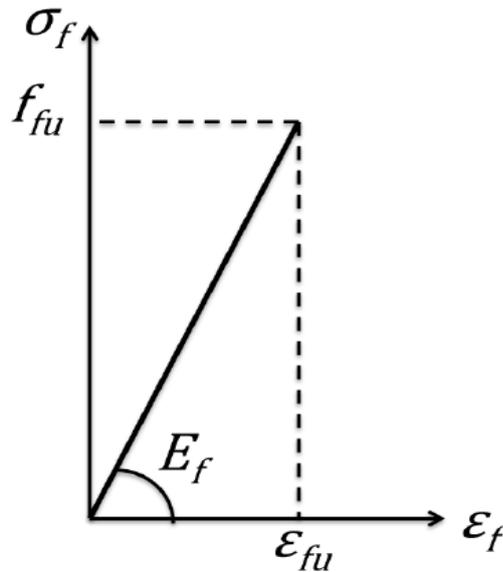
Ainda segundo Beber (2003), os compósitos reforçados com fibras de carbono apresentam uma lista de vantagens em relação a outros tipos de reforços, tais como: a possibilidade de utilizar o composto para qualquer seção transversal; o baixo peso do sistema, o que torna desprezível a consideração da sua carga no dimensionamento do reforço; podem ser aplicados em mais de uma camada, para atender a situações especiais; técnica simples de aplicação; materiais não sofrem deterioração proveniente a ação da maioria dos agentes agressivos (físicos, químicos ou biológicos), com exceção apenas o fogo e os raios ultravioletas; não necessitam de manutenção periódica e menor tempo de execução, o que significa menor tempo de interdição.

## 2.2 Propriedades mecânicas

As propriedades dos PRFC dependem de vários fatores, já que estes não são materiais homogêneos. Dentre os fatores pode-se citar o tipo de fibra, a quantidade e a sua configuração

na matriz polimérica, porém, de modo geral, apresentam comportamento elástico linear até a ruptura e não apresentam patamar de escoamento ou deformações plásticas (BEBER, 2003), conforme pode ser visto na figura 5. Além do que, de acordo com Juvandes (1996), apresentam pequena deformação de ruptura, menos de 3%.

Figura 5 - Diagrama tensão-deformação do PRFC.



Fonte: Araújo, 2014.

onde:

$f_{fu}$  – Resistência do PRFC à tração.

$E_f$  – Módulo de elasticidade do PRFC à tração.

$\epsilon_{fu}$  – Deformação específica de ruptura do PRFC à tração.

As fibras de carbono, de acordo com ACI 440.2R-8 (2017), em relação à resistência e rigidez, apresentam módulo de elasticidade que varia de 220 *GPa* a 690 *GPa*, enquanto a resistência varia de 1380 *MPa* a 6200 *MPa*, conforme pode ser visto na tabela abaixo.

Tabela 1 - Propriedades típicas dos PRFC à tração.

TIPO DE FIBRA DE CARBONO	Módulo de elasticidade (Gpa)	Resistência Máxima de Tração (Mpa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220-240	2050-3790	>1,2
Alta resistência	220-240	3790-4820	>1,4
Ultra alta resistência	220-240	4820-6200	>1,5
Alto módulo	340-520	1720-3100	>0,5
Ultra alto módulo	520-690	1380-2400	>0,2

Fonte: Adaptada de ACI 440.2R-8, (2017).

Em relação à fadiga, a resistência das fibras de carbono em comparação aos metais e outros compósitos é superior, conforme cita Beber (2003), considerando-se que as solicitações dos compósitos sejam na mesma direção das fibras. Sendo os polímeros materiais viscoelásticos e que apresentam deformação contínua sob tensão, conforme cita Beber (2003), então sob altas temperaturas o desempenho deste material quanto à fluência requer atenção. Nos compósitos de fibra de carbono, para solicitações na direção das fibras, o comportamento em relação à fluência pode ser comparado ao dos aços de baixa relaxação.

Silva Filho (2007) apresenta os valores admitidos para a densidade específica da fibra de carbono, que varia de 1,8 a 2,12, de acordo com o tipo. Machado (s/d) afirma que a dilatação térmica de compostos unidirecionais de carbono depende fundamentalmente do tipo de fibra, da matriz e do volume de fibra nessa combinação. Para um composto unidirecional de fibra de carbono típico, tem-se os seguintes valores:

Tabela 2 - Coeficiente de dilatação térmica das fibras de carbono.

Direção	Coeficiente de dilatação térmica
Longitudinal ( $\alpha_L$ )	$-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $0/^{\circ}\text{C}$
Transversal ( $\alpha_L$ )	$22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Fonte: Machado, s/d.

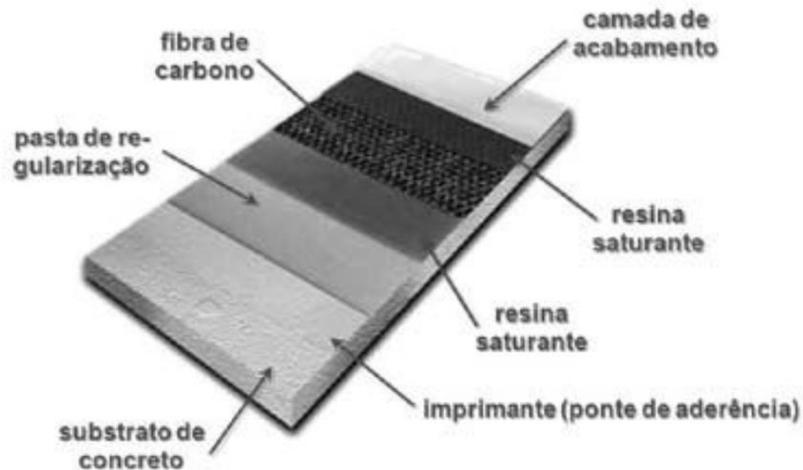
Os dados apresentados no quadro acima refletem diretamente no comportamento do compósito frente às variações de temperatura, indicam que o material sofre contração com o aumento da temperatura e se dilata com a diminuição dela. Machado (s/d) comenta ainda a partir de uma determinada temperatura o polímero começa a tornar-se amolecido, a esta temperatura dá-se o nome de temperatura de transição vítrea ( $T_G$ ), nos quais, acima desta o módulo de elasticidade é reduzido de maneira significativa. O valor de  $T_G$  depende do tipo de fibra, mas varia geralmente entre  $80^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ , estudos apontam que temperaturas na faixa de  $240^{\circ}\text{C}$  diminuem cerca de 20% a resistência à tração do compósito (MACHADO, s/d).

### 2.3 Aspectos construtivos do sistema

Os procedimentos de instalação dos compósitos sofrem variação de acordo com o sistema adotado e com o tipo e condições da estrutura na qual será aplicado. Com o desenvolvimento da técnica, segundo Borges (2016), os fabricantes desenvolveram sistemas de instalação e fornecem seus manuais, procedimentos e especificações para a utilização do

reforço em estruturas. Serão abordadas questões de importância significativa para o sucesso na aplicação de lâminas e tecidos compostos de fibra de carbono em estruturas de concreto armado, a figura abaixo ilustra a sequência recomendada para a execução dos sistemas estruturados de fibra de carbono.

Figura 6 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono.



Fonte: Machado, s/d.

### 2.3.1 Recuperação do substrato de concreto

De acordo com Borges (2016), antes de iniciar qualquer procedimento de reforço, adota-se medidas para correção quando a estrutura já apresenta patologias. Há a necessidade de realização de reparos para garantir um substrato íntegro, que disponha de suficiente resistência mecânica para promover a transferência dos esforços da estrutura para o reforço e de boa aderência da superfície para, no caso de reforços colados, impedir que a ruptura ocorra na interface entre o reforço e o substrato.

A corrosão de armaduras é uma das manifestações patológicas mais frequentes e que exige reparo e correção. Mas, além da correção é necessário identificar quais as causas da patologia, a fim de que esta não volte a ocorrer. Para o reparo da corrosão são empregados os seguintes procedimentos: remoção do concreto desagregado junto às armaduras, limpeza da corrosão das barras da armadura, passivação das armaduras e recomposição do substrato de concreto.

Mesmo que em muitas situações a presença de trincas e fissuras afetem apenas questões de conforto visual e estético, estas também devem ser corrigidas antes da aplicação

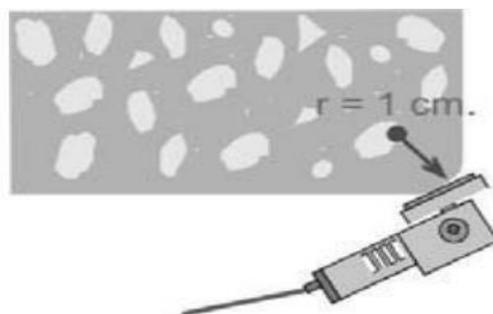
do reforço, e se a abertura for superior a  $0,25mm$  devem ser recuperadas com procedimentos convencionais de injeção.

### 2.3.2 Preparação da superfície

Garantida a integridade do substrato, de modo que ele seja capaz de transferir os esforços para o reforço colado, esta etapa poderá ter diferentes configurações, que dependerão basicamente do tipo de aplicação: colagem crítica ou contato crítico. De acordo com Araújo (2014), a colagem crítica é utilizada na maioria das aplicações de reforço à flexão ou cisalhamento, na qual é necessário o uso de um adesivo para fixar o sistema de reforço estrutural. Já o contato crítico é principalmente utilizado no confinamento de colunas, apesar da não obrigatoriedade da colagem, esta é realizada, para facilitar a aplicação (ACI 440.2R-8, 2017).

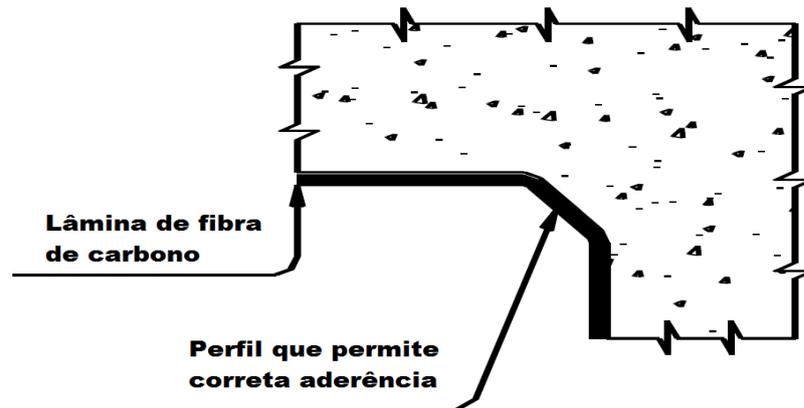
É utilizada a colagem crítica se o reforço a ser aplicado envolver quinas, então estas devem ser arredondadas para que seja evitada a concentração de tensões. Este arredondamento pode ser feito com a utilização de politriz, no caso de quinas, ou com aplicação de massa regularizadora com acabamento lixado, no caso de cantos convexos, ver figuras 7 e 8 abaixo. Bem como as elevações na superfície da peça de concreto, que devem ser removidas. Deve também ser realizada uma limpeza completa da superfície, para que partículas sólidas ou qualquer outro material que possa interferir na aderência do substrato com o reforço sejam removidas (MACHADO, s/d). No contato crítico, a preparação da superfície deve promover um contato contínuo entre o substrato e o sistema de reforço.

Figura 7 - Arredondamento de quina com politriz.



Fonte: Borges, 2016.

Figura 8 - Conformação dos cantos internos.



Fonte: Machado, s/d.

### 2.3.3 Aplicação de primer

Para que haja a impregnação do concreto, pode ser aplicada uma demão de imprimadorepoxídico (*primer*) sobre a superfície preparada do substrato, para que hajaconsolidação das partículas soltas e o impedimento da absorção da água contida na resina, pela porosidade do concreto (BORGES, 2016).

### 2.3.4 Aplicação do compósito

A colação do PRFC deve ser imediata, de acordo com Araújo (2014), tendo em vista que o tempo para aplicação da resina saturante ou do adesivo é muito curto, variando de 25 a 30 minutos. E este tempo pode variar conforme a temperatura do ambiente, quanto maior a temperatura, menor o tempo;a umidade também reflete no desempenho da resina.

A geometria do sistema é especificada em projeto, então, o sistema de reforço deve ser preparado para aplicação seguindo as dimensões projetadas. O ACI 440.2R-8(2017) estabelece um desvio máximo aceitável na inclinação – desalinhamento entre o sentido das fibras de carbono e o eixo da peça estrutural – menor que 5°.

Os procedimentos se diferenciam de acordo com o tipo de compósito de fibra de carbono a ser utilizado. De acordo com Borges (2016)as alternativas são:

- a) Saturação *in loco* via úmida, na qual, após o corte das lâminas ou das folhas de fibra carbono, passa-se para o procedimento de aderência à peça de concreto. A impregnação das fibras com resina é feita em bancada própria e depois transportada

para aplicação na peça a ser reforçada. Esse tipo de aplicação é de fácil execução e pouco trabalhosa. No entanto, conforme aponta Borges (2016) em seu estudo, existem limitações no transporte da lâmina saturada, cujo comprimento não deve ultrapassar 3,5m a 4,0m.

- b) Saturação *in loco* via seca, nesse caso, a aplicação da resina (saturação) é realizada diretamente sobre o concreto para em seguida ser aplicada a lâmina de fibra carbono. Conforme aponta Borges (2016):

“(...) a aplicação é feita com a utilização de rolo metálico ou espátula que servem para promover o alinhamento das fibras e a expulsão de bolhas de ar aprisionadas. O reposicionamento da lâmina é possível em até 25 a 30 minutos, tempo de aplicação da resina. Uma vez aplicada a lâmina de fibra carbono deve-se esperar em torno de 30 minutos para se proceder a uma segunda saturação, por sobre a lâmina instalada, de modo a garantir que as fibras estejam completamente imersas em resina. Caso sejam necessárias diversas camadas de lâminas, repetem-se os procedimentos de saturação, respeitando os períodos de cura e aplicam-se as lâminas uma sobre as outras. Uma importante observação é que cada lâmina requer duas camadas de resina independentes, não podendo a última camada da lâmina anterior ser considerada a de aplicação da próxima.” (p. 16).

- c) Sistemas pré-curados, de acordo com as prescrições normativas da ACI 440.2R-8(2017), são os produtos fabricados por meio de processos de pultrusão, ou seja, de prensagem a quente. Apresentam-se no mercado na forma de laminados, barras, cabos e tecidos e são tipicamente instalados com uma base epóxi (adesivo) que deve ser uniformemente espalhado na superfície do substrato já imprimado. Na aplicação, semelhante à saturação via seca, também são utilizados rolos metálicos. O compósito de fibra carbono pré-curado deve ser previamente limpo e preparado de acordo com as especificações do fabricante. Quando é necessária a aplicação de mais de uma lâmina, recomenda-se o uso de ferramentas, conforme pode ser visualizado na figura abaixo, que distribuam uniformemente o adesivo nas lâminas.

Figura 9 - Ferramenta de aplicação de adesivo sobre a lâmina.



Fonte: Borges, 2016.

Alguns cuidados devem ser tomados quando se tem a aplicação de laminados pré-fabricados, dada a sua rigidez e grandeza dos esforços que se observam nesses compósitos mais espessos (BORGES, 2016). Quando ocorre o cruzamento de laminados, o posicionamento das fibras e espessura do adesivo devem ser levados em consideração na determinação do braço de alavanca, para fins de dimensionamento. Além da necessidade de utilização de ancoragem

### 3. REFORÇO DE VIGAS E LAJES

#### 3.1 Dimensionamento de reforço em vigas

Ensaaios experimentais em vigas reforçadas com PRF constataram aumento significativo na resistência, diminuição da abertura de fissuras, para qualquer estágio de carregamento e diminuição também da ductilidade (ARAÚJO, 2014). Porém, o sucesso na aplicação desta técnica consiste principalmente na correta preparação da superfície de concreto e o uso da resina apropriada para a situação.

De acordo com Adorno et al.(2015), o modelo de cálculo para reforço à flexão com PRFC possui mesmas considerações utilizadas no dimensionamento de estruturas de concreto armado. Adorno et al. (2015) aponta ainda que, para o dimensionamento, considera-se que o compósito possui comportamento linear até a ruptura (figura 5) e que a aderência com o concreto por meio da resina é perfeita, isto garante que a ruptura não ocorrerá sob hipótese alguma na interface entre o concreto e o compósito; e que, devido a ausência de normas brasileiras que regulamentem o uso do reforço com fibras de carbono, admite-se as recomendações de ACI 440.2R-8 (2017).

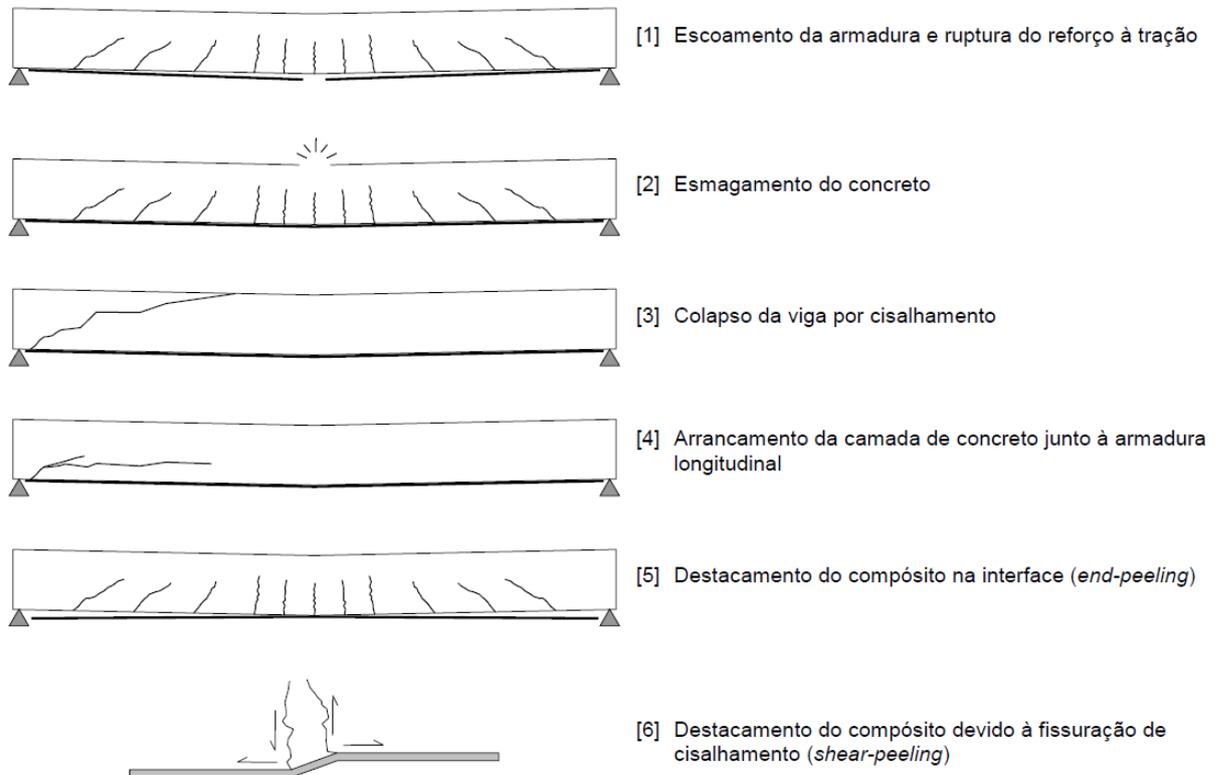
Em relação à ruptura dos materiais, dimensiona-se a viga de modo que o escoamento da armadura ocorra antes do esmagamento do concreto ou do rompimento da fibra, assim, a estrutura apresentará fissuras antes de entrar em colapso (ARAÚJO, 2014). Dada a insuficiência de garantia da correta aplicação do reforço, algumas medidas são necessárias, a fim de que os riscos sejam minimizados, tais como: utilização de coeficientes de majoração, utilização de comprimento de ancoragem, limitar a tensão e deformação específica que atua no compósito, por exemplo.

##### 3.1.1 Dimensionamento à flexão

O dimensionamento do reforço de vigas em concreto armado com PRFC é feito para o Estado Limite Último (ELU), de acordo com os procedimentos de dimensionamento de estruturas de concreto armado, conforme aponta Adorno et al.(2015), e levando-se em consideração os limites de tensão e deformação dos materiais. Determina-se também o momento máximo resistido pela peça, para que seja possível analisar se a viga realmente precisa de reforço. Se o novo carregamento gerar um momento superior ao momento máximo resistente da peça, esta deve ser reforçada, conforme afirma Adorno et al. (2015). Na figura

abaixo, de acordo com Beber (2003), estão representadas as 6 formas distintas em que pode ocorrer ruptura numa viga de concreto armado reforçada com PRF:

Figura 10 - Modos de ruptura de uma viga reforçada com PRF.



Fonte: Beber, 2003.

De acordo com Araújo (2014), para o dimensionamento das vigas devem ser feitas algumas considerações:

- Até a ruptura as seções transversais planas permanecem planas.
- Nas seções flexionadas, a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura ( $\epsilon_{cu}$ ) depende da resistência do concreto, sendo que:

$$\text{Para } 20 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa adota-se } \epsilon_{cu} = 3,5\text{‰} \quad (3.01a)$$

$$\text{Para } 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa, adota-se } \epsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 3,5\text{‰} \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \quad (3.01b)$$

onde  $f_{ck}$ : é a resistência característica à compressão do concreto em Megapascal.

- Para a deformação de compressão entre a deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar elástico ( $\epsilon_{c2}$ ) e  $\epsilon_{cu}$ , a tensão de compressão do concreto ( $\sigma_{cd}$ ) é constante e vale:

$$\sigma_{cd} = 0,85 f_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.02)$$

onde:

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

$\gamma_c$  – coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

- A resistência à tração do concreto é desprezada.
- No gráfico, a distribuição de tensões de compressão no concreto tem a forma parábola-retângulo, que pode ser substituída pelo retângulo de profundidade  $y = \lambda x$ , nos quais, a tensão constante atuante até a profundidade  $y$ , pode ser tomada igual a  $\alpha_c f_{cd}$ . Onde  $\lambda$  e  $\alpha_c$  são:

- Para  $20 \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ :

$$\lambda = 0,8 \text{ e } \alpha_c = 0,85 \quad (3.03a)$$

- Para  $50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ :

$$\lambda = 0,8 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{400} \right) \text{ e } \alpha_c = 0,85 \left[ 1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \quad (3.03b)$$

- A aderência entre o aço e o concreto é considerada perfeita.
- A deformação de tração na ruptura do aço é dada por:

$$\epsilon_{uk} = 10\%_0 \quad (3.04)$$

- O módulo de elasticidade do aço é dado por:

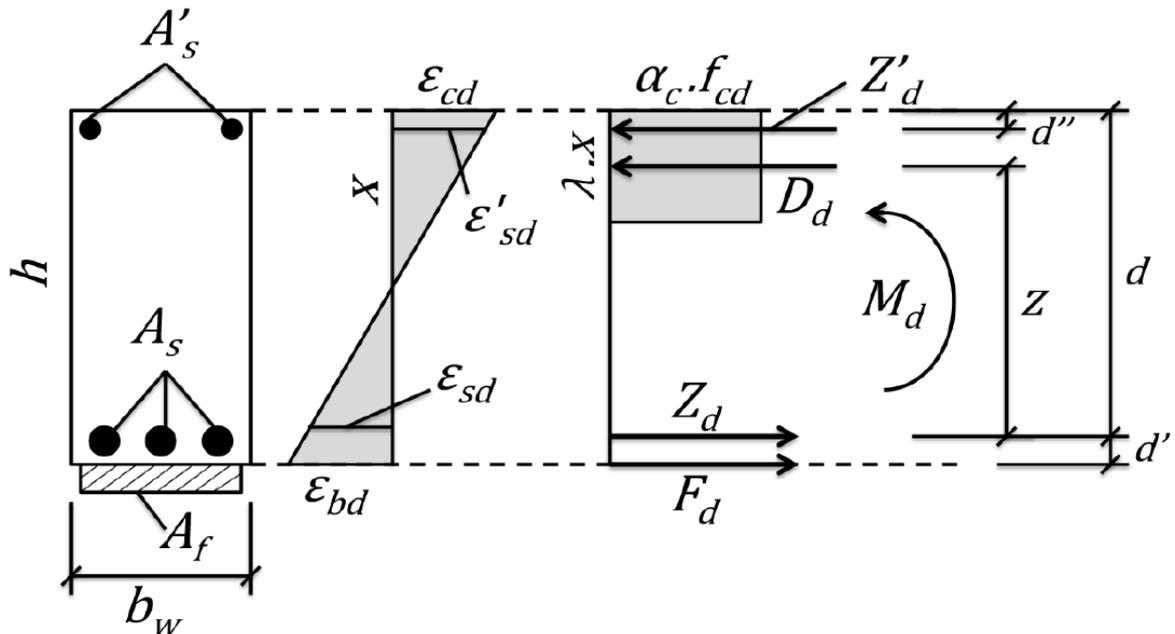
$$E_s = 210 \text{ GPa} \quad (3.05)$$

- Considera-se que o diagrama tensão-deformação do PRFC é linear até a sua ruptura.

- É considerado que a aderência entre o compósito e o concreto é perfeita.

Esquema do dimensionamento de reforço de uma viga que possui seção transversal retangular, armada à compressão e tração:

Figura 11 - Esquema da viga com reforço.



Fonte: Araújo, 2014.

São utilizadas duas equações de equilíbrio: os somatórios de forças horizontais e os de momentos na altura das armaduras de tração:

$$F_d + Z_d = D_d + Z'_d \quad (3.07)$$

$$M_d = Z'_d \times (d - d'') + D_d \times z + F_d \times d' \quad (3.08)$$

sendo,

$$F_d = A_f \times \sigma_f \quad (3.09a)$$

$$Z_d = A_s \times \sigma_{sd} \quad (3.09b)$$

$$Z'_d = A'_s \times \sigma'_{sd} \quad (3.09c)$$

$$D_d = \lambda \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \quad (3.09d)$$

$$z = d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \quad (3.10)$$

sendo:

$\sigma_f$  – tensão no PRF.

$\sigma_{sd}$  – tensão no aço de tração.

$\sigma'_{sd}$  – tensão no aço de compressão.

$F_d$  – força atuante no PRFC da viga.

$Z_d$  – força atuante na armadura de tração da viga.

$Z'_d$  – força atuante na armadura de compressão da viga.

$D_d$  – resultante da seção comprimida do concreto.

Além das relações acima, são utilizadas equações de compatibilidade de deformação na seção transversal:

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{bd}} = \frac{x}{h - x} \quad (3.11a)$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{d - x} \quad (3.11b)$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon'_{sd}} = \frac{x}{x - d''} \quad (3.11c)$$

E ainda as relações constitutivas abaixo:

$$\sigma_{sd} = f(\varepsilon_{cd}) \quad (3.12a)$$

$$\sigma'_{sd} = f(\varepsilon'_{cd}) \quad (3.12b)$$

$$\sigma_f = f(\varepsilon_f) \quad (3.12c)$$

Desse modo, conhecendo-se o momento atuante na estrutura antes do reforço, a resistência do concreto, a resistência do aço e as áreas de aço existentes, Souza e Ferrari (2012) apresentam os seguintes passos para resolução do problema:

1. Cálculo da deformação inicial da viga. Considerando-se que o concreto já tem uma deformação inicial ( $\epsilon_{bi}$ ) – de acordo com ACI 440.2R-8 (2017), essa deformação inicial do concreto pode ser determinada com uma análise elástica do elemento existente, levando-se em consideração as propriedades da seção fissurada e todas as cargas atuantes no momento de aplicação de reforço – para encontrar a deformação real no PRF ( $\epsilon_f$ ) é necessário calcular a deformação no concreto após o reforço ( $\epsilon_{bd}$ ):

$$\epsilon_f = \epsilon_{bd} - \epsilon_{bi} \quad (3.13)$$

2. Escolha da altura da linha neutra para o domínio 3. Segundo Souza e Ferrari (2012), no domínio 3 há uma economia de reforço, já que as resistências do aço e do concreto são aproveitadas ao máximo.
3. Aplicação das equações de compatibilidade do diagrama de deformações da seção transversal, já apresentadas acima.
4. Aplicação das relações constitutivas (3.12a a 3.12c), com as deformações no aço de compressão e no PRF, é possível conhecer a tensão atuando neles.
5. Aplicação da primeira equação de equilíbrio (3.07). Impondo-se a condição de enquadrar a estrutura no domínio 3, utilizar o equilíbrio de momentos na seção para encontrar uma área de compósito, depois utilizar o equilíbrio de forças horizontais na seção para, com essa área de PRF, estimar uma nova altura para a linha neutra. É feita uma comparação da altura da linha neutra com a adotada inicialmente e, se não estiverem próximas o suficiente, retoma-se o cálculo, através de um processo iterativo, considerando a altura da linha neutra como a calculada por último, e repete-se o procedimento até que se atinja o equilíbrio.
6. Escolha da área de PRFC. Levando-se em consideração as propriedades geométricas do reforço, tais como a espessura, adota-se a quantidade de camadas e a largura de aplicação do reforço, o que definirá a sua área efetiva ( $A_{f,ef}$ ), que deve ser superior à calculada ( $A_{f,calc}$ ), conforme a relação abaixo.

$$A_{f,ef} \geq A_{f,calc} \quad (3.14)$$

7. Aplicação da segunda equação de equilíbrio (3.08). Serão utilizados todos os valores encontrados até então para calcular uma nova altura da linha neutra, de acordo com a área efetiva de PRF adotada, através do equilíbrio de forças na seção, equação abaixo.

$$\alpha_c f_{cd} \lambda x b_w + A'_s \sigma'_{sd} = A_s \sigma_{sd} + A_{f,ef} \sigma_f \quad (3.15)$$

8. Comparação da linha neutra encontrada no passo 7, com a escolhida no passo 2. Se a diferença for menor que a tolerância determinada, significa que as equações de equilíbrio podem ser consideradas satisfeitas e a área de PRF encontrada pode ser adotada. Se a diferença for maior que a tolerância, o procedimento deve ser repetido a partir do passo 3, utilizando a nova altura da linha neutra, sendo realizadas iterações, até se atingir o equilíbrio. Seguindo esse procedimento é possível a determinação da área de PRF que atinge a necessidade de resistência da peça, com o equilíbrio da seção, e economia.

Aplica-se um fator de redução da contribuição do reforço na resistência à flexão, a fim de aumentar a confiabilidade da estimativa de força atuante neste; com base em estudos experimentais, o ACI 440.2R-8 (2017) sugere que o valor desse fator de redução é de 0,85, que deve ser independente do uso de coeficiente de redução das propriedades do sistema PRFC pela exposição ao ambiente.

Através de um estudo experimental, Cheng e Teng (2001, *apud* ARAÚJO, 2014), propuseram a avaliação do comprimento de ancoragem efetivo ( $L_e$ ) adequado e a tensão máxima que deve atuar no reforço ( $\sigma_{f,máx}$ ) para que não haja ruptura prematura no mesmo, essa tensão é dada por:

$$\sigma_{f,máx} = \frac{0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f_{ck} L_e}}{t_{ft}} \quad (3.16)$$

sendo,

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_{ft}}{f_{ck}}} \quad (3.17a)$$

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 - \frac{b_f}{b_w}}} \quad (3.17b)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1, & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen}\left(\frac{\pi L}{2L_e}\right), & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (3.17c)$$

onde:

$b_f$  – largura do reforço

$b_w$  – largura da viga

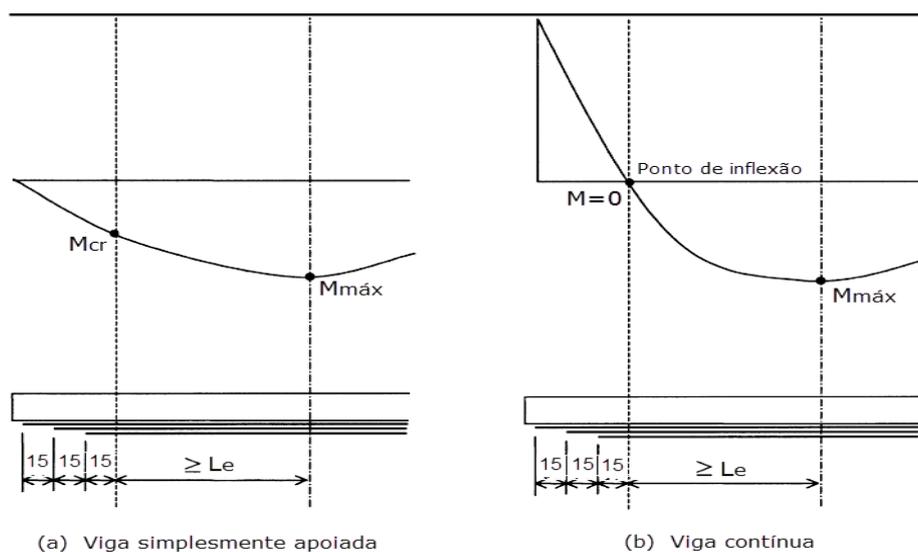
$t_{ft}$  – espessura do reforço

$L$  – comprimento de ancoragem utilizado.

As unidades das Equações 3.16 e 3.17 devem ser Newtons (N) e milímetros (mm).

Sendo assim, oACI 440.2R-8(2017) recomenda que, em vigas biapoiadas com uma única camada de PRF, o reforço deve se estender ao menos 15 cm após o ponto correspondente ao momento de fissuração. Caso a viga seja contínua, o reforço deve se estender ao menos 15 cm após o ponto de inflexão. Quando se tem mais de uma camada, além dessa recomendação, deve ser feita uma defasagem de 15 cm do término das camadas subsequentes, conforme pode ser visto na figura abaixo:

Figura 12 - Pontos de terminação do reforço.



Fonte:ACI 440.2R-8, 2017.

Objetivando prevenir o destacamento do reforço ocasionado por fissuras de flexão, o ACI 440.2R-8(2017) propõe:

$$\varepsilon_{f,máx} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{cd}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad (3.18)$$

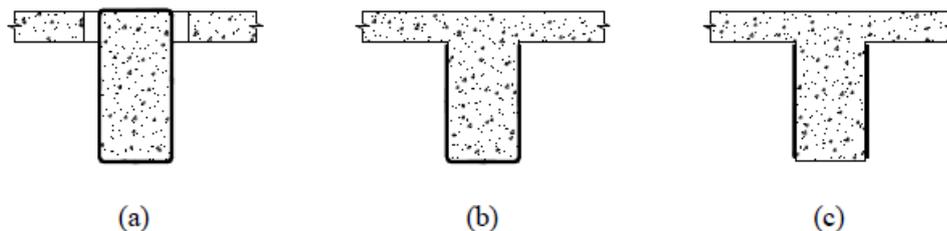
na qual devem ser utilizadas as unidades Newtons (N) e milímetros (mm).

### 3.1.2 Dimensionamento ao cisalhamento

A transferência de esforços de cisalhamento, diferentemente da flexão, depende principalmente da resistência do concreto, tanto à compressão, quanto à tração, o que justifica a ruptura frágil apresentada pelo cisalhamento (ARAÚJO, 2014). Devido ao fato de a ruptura à flexão ser mais dúctil, é preferível que a ruptura ocorra por este motivo e não repentinamente pelo cisalhamento, conforme aponta Beber (2003), bem como, salienta a eficiência da aplicação dos compósitos na elevação da resistência ao cisalhamento.

De acordo com Machado (s/d), existem três maneiras do reforço envolver a seção, conforme pode ser visto na figura 13, que dependem basicamente do acréscimo de carga, acesso ao elemento estrutural, recursos materiais e financeiros disponíveis.

Figura 13 - Configurações possíveis ao cisalhamento.



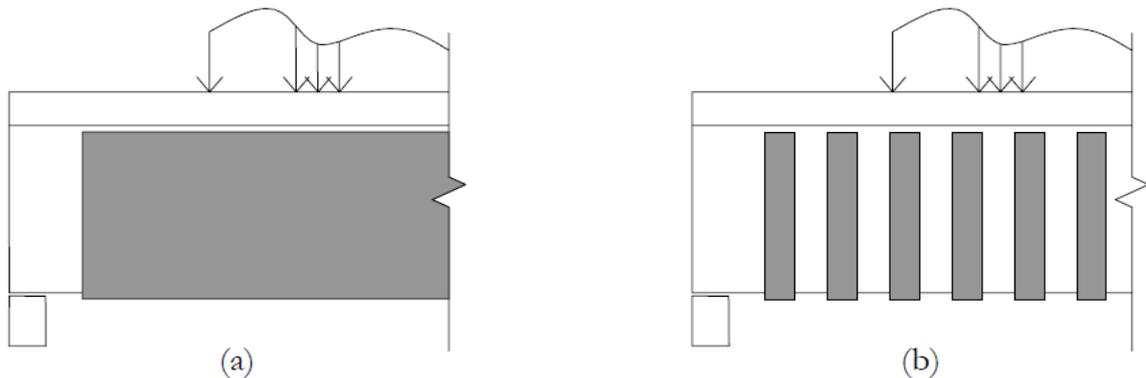
Fonte: Machado, s/d.

A figura 13(a) ilustra o envolvimento total da seção da viga com as lâminas de fibra de carbono, situação que, segundo Machado (s/d), é amplamente utilizada para vigas que não possuem lajes tanto na parte superior quanto inferior, a qual, apesar de mais onerosa, é a configuração mais eficiente. A figura 13(b) apresenta o envolvimento chamado de “U”, que abrange apenas três lados da seção transversal, opção bastante utilizada em vigas com lajes, tem aumento significativo de eficiência quando utilizadas em regiões de momento positivo. Já o detalhe exibido na figura 13(c) é utilizado quando não é possível o envolvimento da parte de baixo da peça, apesar de ser o modo menos eficiente de utilização do PRFC, dadas as

dificuldades de se realizar a ancoragem, é a única alternativa para algumas situações, conforme aponta Machado (s/d).

O reforço pode ser aplicado de maneira contínua, ou, de modo semelhante aos estribos, com tiras espaçadas, conforme pode ser visto nas figuras abaixo:

Figura 14 - Exemplos de distribuição do reforço com PRFC.



Fonte: Beber, 2003.

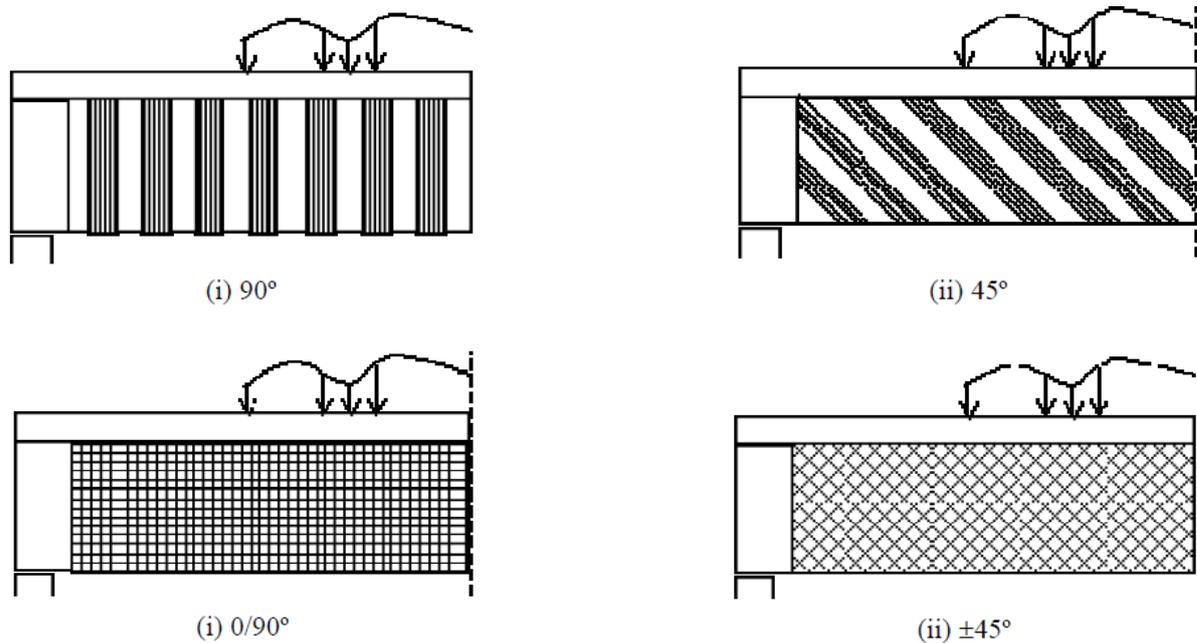
O ACI 440.2R-8 (2017) recomenda que seja evitada a distribuição do reforço apresentado na figura 14(a), pois, este tipo de envolvimento dificulta a migração de umidade da peça; e que, na aplicação apresentada na figura 14(b), em tiras, seja adotado espaçamento:

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{d}{4} + W_f \quad (3.19)$$

onde  $W_f$  é a largura das tiras e  $d$  é a altura útil da viga.

A orientação de aplicação das fibras, de acordo com Araújo (2014), é um fator determinante na sua eficiência, podem ser aplicadas na vertical ou inclinadas, conforme a figura abaixo. Em algumas situações, de acordo com Araújo (2014), é possível a aplicação de duas camadas de reforço ortogonais entre si, cuja ideia principal é que a primeira camada absorva a maior parte dos esforços, e a segunda proporcione uma melhor aderência da primeira camada, diminuindo a abertura de fissuras.

Figura 15 - Orientação e distribuição das fibras de PRFC.



Fonte: Barros, s/d.

Para o dimensionamento, adotando-se o Modelo de cálculo I ao cisalhamento da NBR 6118 (2014), verifica-se inicialmente se a viga satisfaz à seguinte condição:

- $V_{Rd2} \geq V_{sd}$ , ou seja, a força cortante resistente de cálculo, em relação ao esmagamento das bielas comprimidas, tem que ser superior a cortante solicitante de cálculo. Onde:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad (3.20a)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (3.20b)$$

sendo:

$V_{Rd2}$  – força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto

$V_{sd}$  – força cortante solicitante de cálculo.

O próximo passo para o dimensionamento ao cisalhamento é a verificação da capacidade resistente referente à armadura de cisalhamento, que pode ser calculada através das prescrições do Modelo de cálculo I, da NBR 6118 (2014) através das expressões abaixo:

- $V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$ , nos quais, será verificada a capacidade resistente da peça que ainda não recebeu reforço ao cisalhamento ( $V_{Rd3}$ ) através da soma dos mecanismos complementares ao modelo de treliça ( $V_c$ ) com os estribos ( $V_{sw}$ ). Sendo,

$$\begin{aligned} V_c &= 0,6 \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} b_w d \\ &= 0,6 \frac{f_{ck}^{2/3} 0,70,3}{\gamma_c} b_w d \end{aligned} \quad (3.21a)$$

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 d f_{ywd} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha), \text{ em que } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (3.21b)$$

onde:

$f_{ywd}$  – resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura transversal.

$A_{sw}$  – área da seção transversal dos estribos.

$s$  – espaçamento dos estribos.

$f_{ctk,inf}$  – valor mínimo para resistência à tração direta do concreto armado.

A partir dos resultados encontrados nas verificações acima, pode-se proceder com a verificação do esforço o qual o reforço deverá resistir ( $V_{fc}$ ):

$$V_{sd} = V_{Rd3} + V_{fc} \quad (3.22)$$

Considerando o modelo clássico de treliças, preconizado pela NBR 6118 (2014), pode-se determinar o  $V_{fc}$  a partir da equação abaixo:

$$V_{fc} = 2 n t_f d_f f_{fd} (\text{sen} \beta + \text{cos} \beta) \frac{w_f}{s_f} \quad (3.23)$$

onde:

$n$  – número de camadas de reforço.

$t_f$  – espessura de cada camada de reforço.

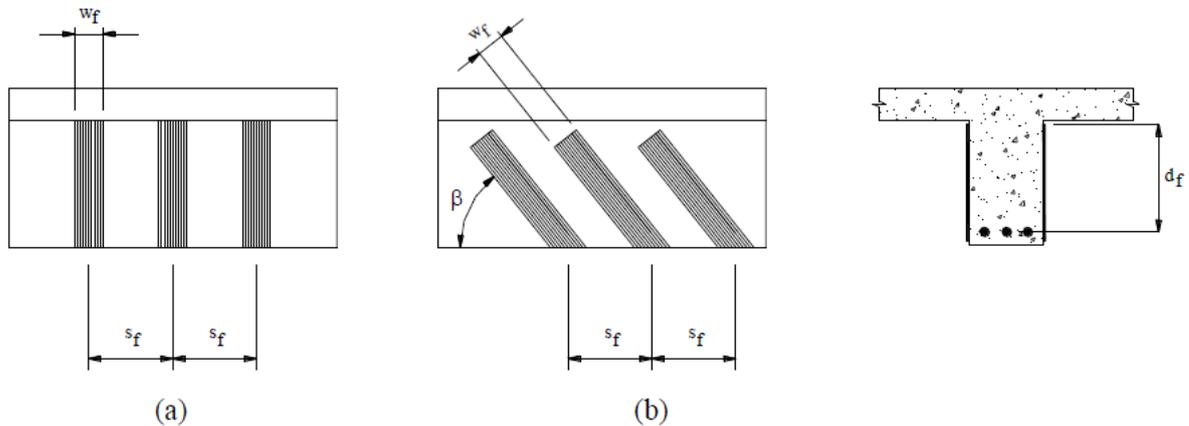
$f_{fd}$  – tensão máxima de tração que deve ser atingida pelo PRFC.

$w_f$  – largura das tiras de reforço ao cisalhamento.

$s_f$  – espaçamento das tiras de reforço ao cisalhamento.

A figura abaixo ilustra largura, espaçamento das tiras do composto e a inclinação do reforço aplicado:

Figura 16 - Indicação de largura, espaçamento e inclinação da fibra de carbono.



Fonte: Machado, s/d.

Machado (s/d) recomenda que o esforço ao qual o reforço deverá resistir deverá obedecer à seguinte expressão:

$$V_{fc} \leq 0,332\sqrt{f_{cd}}b_wd \quad (3.24)$$

Já o ACI 440.2R-8 (2017), recomenda que este esforço deve obedecer à seguinte relação:

$$V_{sw} + V_{fc} \leq 0,66\sqrt{f_{cd}}b_wd \quad (3.25)$$

Para o reforço ao cisalhamento o ACI 440.2R-8 (2017) recomenda a aplicação de um fator de redução  $\psi_{fc} = 0,85$  para o envolvimento da viga tipo “U”, com base em resultados de estudos experimentais. Para situações de envolvimento total da viga, este fator é 0,95. Para qualquer situação, o ACI 440.2R-8 (2017) recomenda que este coeficiente seja adotado independentemente de fatores de redução por exposição ambiental.

A deformação efetiva do PRF, para casos em que o reforço envolve totalmente a seção, deve limitar-se a:

$$\varepsilon_{fc} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (3.26)$$

Nos casos em que o envolvimento da seção é do tipo “U” considera-se a ocorrência de delaminação do compósito, antes da perda de engrenamento de agregados, sendo adotado então, um coeficiente de redução da deformação ( $k_v$ ) (ARAÚJO, 2014):

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (3.27a)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_{ew}}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,075 \quad (3.27b)$$

onde,

$$L_{ew} = \frac{23300}{(nt_f E_f)^{0,58}} \quad (3.28a)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27}\right)^{2/3} \quad (3.28b)$$

$$k_2 = \left(\frac{d_{fe}}{d_f}\right) \quad (3.28c)$$

sendo,

$$d_{fe} = \begin{cases} d_f - L_{ew}, & \text{para envolvimento tipo "U"} \\ d_f - 2L_{ew}, & \text{para envolvimento lateral} \end{cases} \quad (3.29)$$

sendo:

$L_{ew}$  – comprimento efetivo de ancoragem

$d_{fe}$  – comprimento efetivamente aderido do PRFC. A equação 3.29 está definida para unidades do SI.

### 3.2 Dimensionamento de reforço em lajes

O reforço à flexão em lajes é realizado com a colagem do compósito na face tracionada da laje (TENG, 2003, *apud* ARAÚJO, 2014). É recomendado deixar partes de concreto sem a cobertura do compósito, para facilitar a migração da umidade e para eventuais monitoramentos da

estrutura. As cargas atuantes podem ser determinadas da mesma forma que é feito em lajes comuns de concreto armado, seguindo as recomendações da NBR 6118 (2014). Com os momentos máximos atuantes, utiliza-se o procedimento descrito no item 3.1.1 para o reforço à flexão de vigas, dividindo a laje em faixas de forma similar àquela usada no cálculo das armaduras de lajes de concreto armado. A aplicação é feita como pode ser visto nas figuras abaixo:

Figura 17 - Reforço com PRFC em duas direções.



Fonte: Araújo, 2014.

Figura 18 - Reforço com PRFC em uma direção.



Fonte: Araújo, 2014.

## 4 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho, conforme exposto anteriormente, é dimensionar o reforço estrutural com PRFC para um pavimento, que inicialmente foi projetado para uso residencial, e, posteriormente, sofrerá modificação de uso, para fins esportivos. Para tal, esse trabalho será iniciado com um estudo detalhado sobre o dimensionamento da estrutura baseado nas normas brasileiras, artigos, monografias, dissertações e teses presentes na literatura. A análise e o dimensionamento da estrutura são baseados na NBR 6118 (2014), utilizando cargas prescritas na NBR 6120 (1980).

A partir do conhecimento dos esforços atuantes na estrutura antes do reforço e daqueles que a estrutura deverá resistir, será realizado o dimensionamento. As propriedades relativas aos materiais, os procedimentos para o seu dimensionamento, e os coeficientes de segurança serão baseados na NBR 6118 (2014), e as propriedades do compósito e seu dimensionamento serão determinados a partir das prescrições do ACI 440.2R-8 (2017).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Considerações iniciais para dimensionamento do reforço

A partir do pré-dimensionamento determina-se a altura adotada para as lajes, conforme a expressão abaixo (PINHEIRO, 2007):

$$d = \frac{(2,5 - 0,1n)l^*}{100} \quad (5.01a)$$

onde,

- $l^*$  é o menor vão entre  $l_x = 6,15m$  e  $0,7l_y = 0,7 \times 6,15 = 4,31m$ . Logo,  $l^* = 4,31m$ .
- $n$  é o número de continuidades, de acordo com Pinheiro (2007), as lajes são representadas de acordo com a vinculação das bordas, conforme ilustra a figura 19 abaixo:

Figura 19 - Representação dos tipos de apoios das lajes.

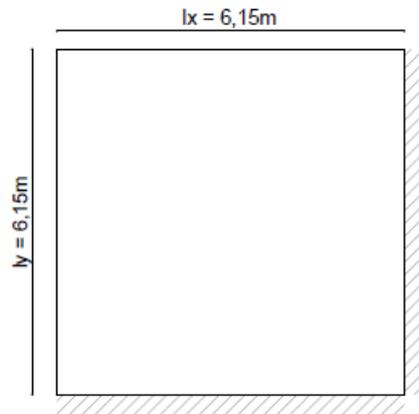
**Tabela 1 – Representação dos tipos de apoio**

Borda livre	Borda simplesmente apoiada	Borda engastada
- - - - -	—————	// // // // //

Fonte: Pinheiro, 2007.

Analisando cada laje separadamente, pode-se concluir que apresentam duas continuidades (dois lados engastados), conforme representação na figura 20 e duas bordas simplesmente apoiadas.

Figura 20 - representação da vinculação das lajes.



Fonte: Autora, 2020.

Então,

$$d = \frac{(2,5 - 0,1 \times 2)4,31}{100} = 9,913 \text{ cm}$$

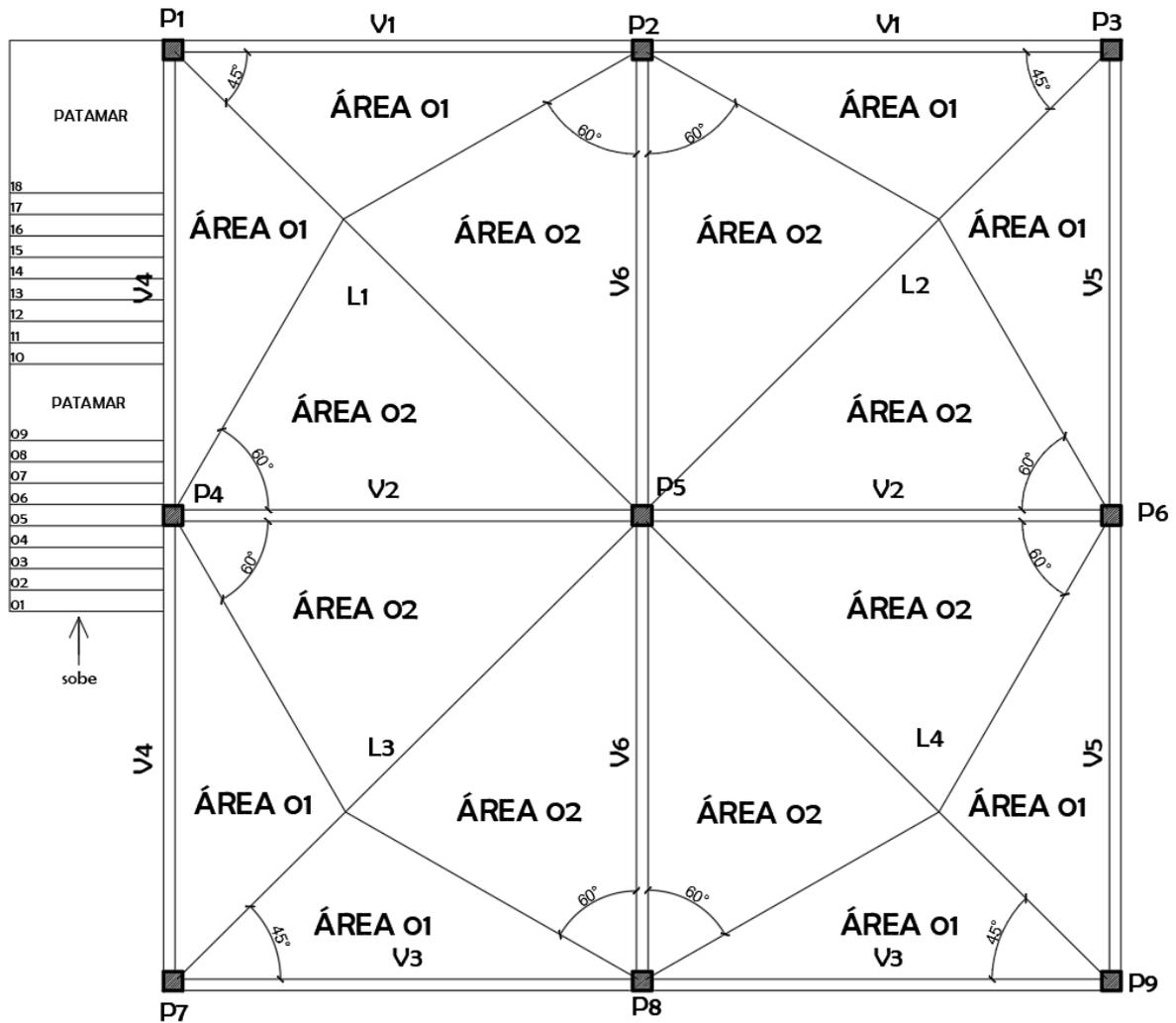
Desse modo, estando a estrutura na classe de agressividade ambiental II, conforme dito no item 1.3, tem-se risco de deterioração pequeno, o que implica no cobrimento nominal da armadura de  $25mm$ , de acordo com a Tabela 7.2 da NBR 6118 (2014) para concreto armado. Logo, a altura mínima final da laje é dada por:

$$h = d + d' = 9,913cm + 2,5cm \cong 12,42cm$$

Neste trabalho será adotada altura final de  $13cm$ , respeitando o disposto no Item 13.2.4.1 da NBR 6118 (2014), cujo limite mínimo para espessura desse tipo de laje é de  $8cm$ .

De acordo com o que preconiza o item 14.7.6.1 da NBR 6118 (2014) para as vinculações de cada laje tem-se o ilustrado na figura 21 abaixo.

Figura 21 - Distribuição das cargas das lajes nas vigas.



Fonte: Autora, 2020.

As vigas consideradas na estrutura, igualmente às lajes, são de concreto armado, terão comprimento e seção transversal conforme já ilustrado acima e suportarão as seguintes áreas de cargas provenientes das lajes:

- Vigas 01, 03, 04 e 05:  $2 \times \text{Área 01} = 2 \times 6,90 = 13,8m^2$
- Vigas 02 e 06:  $4 \times \text{Área 02} = 4 \times 12,015 = 48,06m^2$

## 5.2 Ações atuantes na estrutura

A NBR 6118 (2014) define três tipos de ações que podem gerar efeitos significativos para a estrutura, de modo geral, levando-se em conta os estados limites últimos e de serviço. Ações atuantes na estrutura são as ações permanentes, variáveis e excepcionais. Nesta estrutura as cargas consideradas foram as seguintes:

## a) Ações consideradas para USO RESIDENCIAL

➤ *Lajes*

- Peso próprio( $g_1$ )

Seja a altura das lajes  $h = 13\text{cm}$ , e, de acordo com a NBR 6118 (2014), item 8.2.2, a massa específica considerada para estruturas de concreto armado é  $25\text{KN}/\text{m}^2$  ( $2.500\text{Kgf}/\text{m}^2$ ), então:

$$PP = \gamma_c \times h = 2500\text{Kgf}/\text{m}^2 \times 0,13\text{m} = 325\text{Kgf}/\text{m}^2$$

- Revestimento ( $g_2$ )

Para revestimentos, será adotada sobrecarga de  $100\text{Kgf}/\text{m}^2$ .

- Carga acidental ( $q$ ) proveniente do uso residencial (área de serviço, cozinhas)

De acordo com as especificações da NBR 6120 (1980), Tabela 2, para edificações residenciais (despensa, área de serviço e lavanderia), adota-se como sobrecarga  $200\text{Kgf}/\text{m}^2$ .

Então, tem-se:

$$\begin{aligned} P &= g_1 + g_2 + q = 325\text{Kgf}/\text{m}^2 + 200\text{Kgf}/\text{m}^2 + 100\text{Kgf}/\text{m}^2 \\ &= 625\text{Kgf}/\text{m}^2 \\ &= 6,25\text{KN}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

➤ *Vigas 01, 03, 04 e 05*

- Peso próprio( $g_1$ )

Sejam as dimensões das vigas  $15 \times 60\text{cm}$ , e, de acordo com a NBR 6118 (2014), item 8.2.2, a massa específica considerada para estruturas de concreto armado é  $25\text{KN}/\text{m}^2$ , então:

$$g_1 = \gamma_c \times \text{Área} = 25\text{KN}/\text{m}^2 \times (0,15\text{m} \times 0,60\text{m}) = 2,25\text{KN}/\text{m}$$

- Sobrecarga proveniente das lajes( $g_2$ )

Conforme exposto no item 5.1 deste trabalho, as vigas 01, 03, 04 e 05, cada uma delas deverá suportar  $13,80\text{m}^2$  de área de influência das respectivas lajes, logo:

$$g_2 = \frac{\text{Área de influência} \times P_{\text{laje}}}{\text{Comprimento da viga}} = \frac{13,80\text{m}^2 \times 6,25\text{KN/m}^2}{12,20\text{m}}$$

$$= 7,07\text{KN/m}^2$$

- Sobrecarga proveniente da alvenaria ( $g_3$ )

Considerando a existência de parede de alvenaria com  $0,15\text{m}$  de espessura e  $3,00\text{m}$  de altura sobre essas vigas, e, de acordo com a NBR 6120 (1980), alvenaria de tijolo furado possui massa específica de  $13\text{KN/m}^2$ , então:

$$g_3 = \gamma_{\text{alv}} \times h \times e = 13 \times 3 \times 0,15 = 5,85\text{KN/m}$$

Então, tem-se:

$$P = g_1 + g_2 + g_3 = 2,25\text{KN/m}^2 + 7,07\text{KN/m}^2 + 5,85\text{KN/m}^2$$

$$= 15,17\text{KN}$$

$$/\text{m}^2$$

➤ *Vigas 02 e 06*

- Peso próprio( $g_1$ )

Conforme já calculado acima:  $2,25\text{KN/m}^2$ .

- Sobrecarga proveniente das lajes( $g_2$ )

Conforme exposto no item 5.1 deste trabalho, as vigas 02 e 06, cada uma delas deverá suportar  $48,06\text{m}^2$  de área de influência das respectivas lajes, logo:

$$g_2 = \frac{\text{Área de influência} \times P_{\text{laje}}}{\text{Comprimento da viga}} = \frac{48,06\text{m}^2 \times 6,25\text{KN/m}^2}{12,20\text{m}}$$

$$= 24,63\text{KN/m}^2$$

- Sobrecarga proveniente da alvenaria( $g_3$ )

Conforme já dito acima:  $5,85\text{KN/m}^2$ .

Então, tem-se:

$$P = g_1 + g_2 + g_3 = 2,25 \text{ KN/m}^2 + 24,63 \text{ KN/m}^2 + 5,85 \text{ KN/m}^2 \\ = 32,73 \text{ KN/m}^2$$

b) Ações consideradas para FINS ESPORTIVOS

➤ Lajes

▪ Peso próprio ( $g_1$ )

Seja a altura das lajes  $h = 13\text{cm}$ , e, de acordo com a NBR 6118 (2014), item 8.2.2, a massa específica considerada para estruturas de concreto armado é  $25\text{KN/m}^2$ , então de acordo com a equação (5.03) é  $325\text{Kgf/m}^2$ .

▪ Revestimento ( $g_2$ )

Para revestimentos, será adotada sobrecarga de  $100\text{Kgf/m}^2$ .

▪ Carga acidental ( $q$ ) proveniente do uso para fins esportivos

De acordo com as especificações da NBR 6120 (1980), Tabela 2, será adotada a sobrecarga prevista para ginásio de esportes,  $500\text{Kgf/m}^2$ .

Então, tem-se:

$$P = g_1 + g_2 + q = 325 \text{ Kgf/m}^2 + 100 \text{ Kgf/m}^2 + 500 \text{ Kgf/m}^2 \\ = 925 \text{ Kgf/m}^2 = 9,25 \text{ KN/m}^2$$

➤ Vigas 01, 03, 04 e 05

▪ Peso próprio ( $g_1$ )

Conforme já calculado acima:  $2,25\text{KN/m}^2$ .

▪ Sobrecarga proveniente das lajes ( $g_2$ )

Conforme exposto no item 5.1 deste trabalho, as vigas 01, 03, 04 e 05, cada uma delas deverá suportar  $13,80\text{m}^2$  de área de influência das respectivas lajes, logo:

$$g_2 = \frac{\text{Área de influência} \times P_{\text{laje}}}{\text{Comprimento da viga}} = \frac{13,80\text{m}^2 \times 9,25\text{KN/m}^2}{12,20\text{m}} = 10,47\text{KN/m}^2$$

▪ Sobrecarga proveniente da alvenaria ( $g_3$ )

Conforme dito acima:  $5,85 \text{ KN/m}^2$ .

Então, tem-se:

$$P = g_1 + g_2 + g_3 = 2,25 \text{ KN/m}^2 + 10,47 \text{ KN/m}^2 + 5,85 \text{ KN/m}^2 \\ = 18,57 \text{ KN/m}^2$$

➤ *Vigas 02 e 06*

- Peso próprio ( $g_1$ )

Conforme calculado acima:  $2,25 \text{ KN/m}^2$ .

- Sobrecarga proveniente das lajes ( $g_2$ )

Conforme exposto no item 5.1 deste trabalho, as vigas 02 e 06, cada uma delas deverá suportar  $13,80 \text{ m}^2$  de área de influência das respectivas lajes, logo:

$$g_2 = \frac{\text{Área de influência} \times P_{\text{laje}}}{\text{Comprimento da viga}} = \frac{48,06 \text{ m}^2 \times 9,25 \text{ KN/m}^2}{12,20 \text{ m}} \\ = 36,44 \text{ KN/m}^2$$

- Sobrecarga proveniente da alvenaria ( $g_3$ )

Será considerada, para mudança de uso, a demolição da alvenaria sobre estas vigas, justificando o fato dessa sobrecarga não estar nas considerações de cálculo.

Então, tem-se:

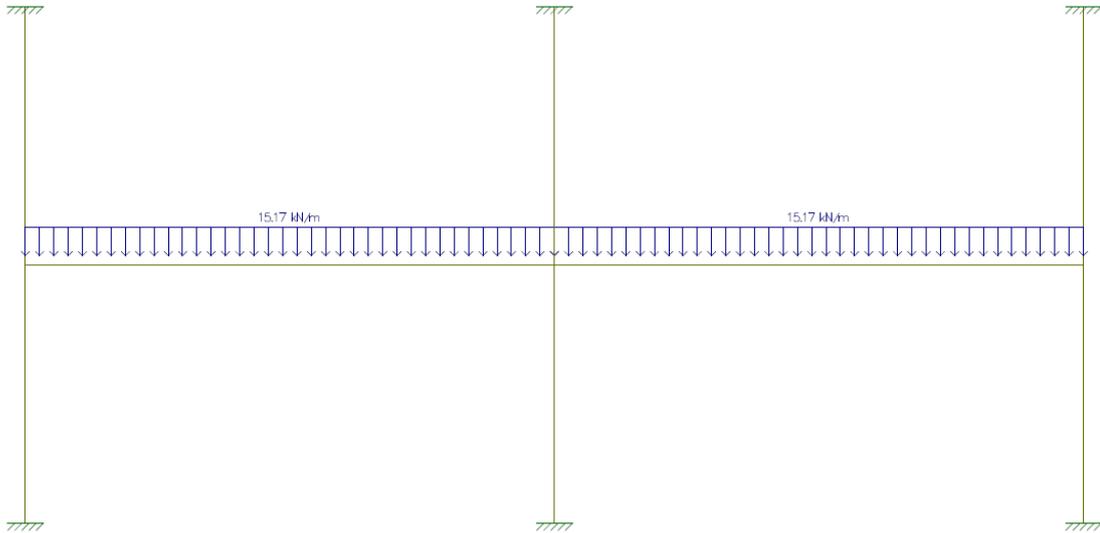
$$P = g_1 + g_2 = 2,25 \text{ KN/m}^2 + 36,44 \text{ KN/m}^2 = 38,69 \text{ KN/m}^2$$

### 5.3 Diagramas de momento fletor e de força cortante das vigas

Através do uso do *software* FTOOL foram construídos modelos da estrutura com os esforços atuantes, definidos acima, para a determinação dos diagramas de momento fletor e de força cortante para uso residencial e para fins esportivos:

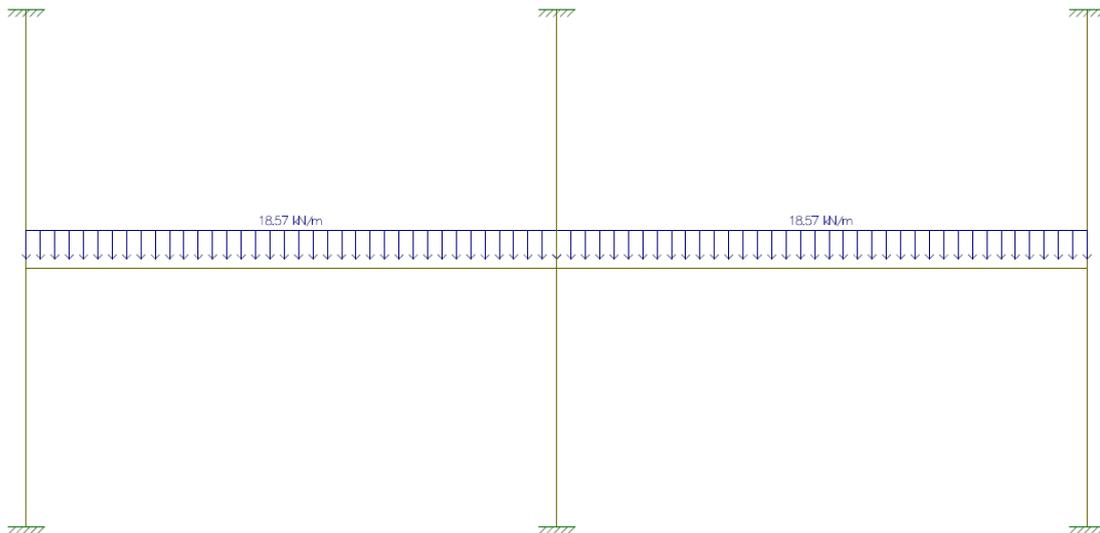
➤ *Vigas 01, 03, 04 e 05*

Figura 22 - Vigas 01, 03, 04 e 05 com carregamento calculado para uso residencial.



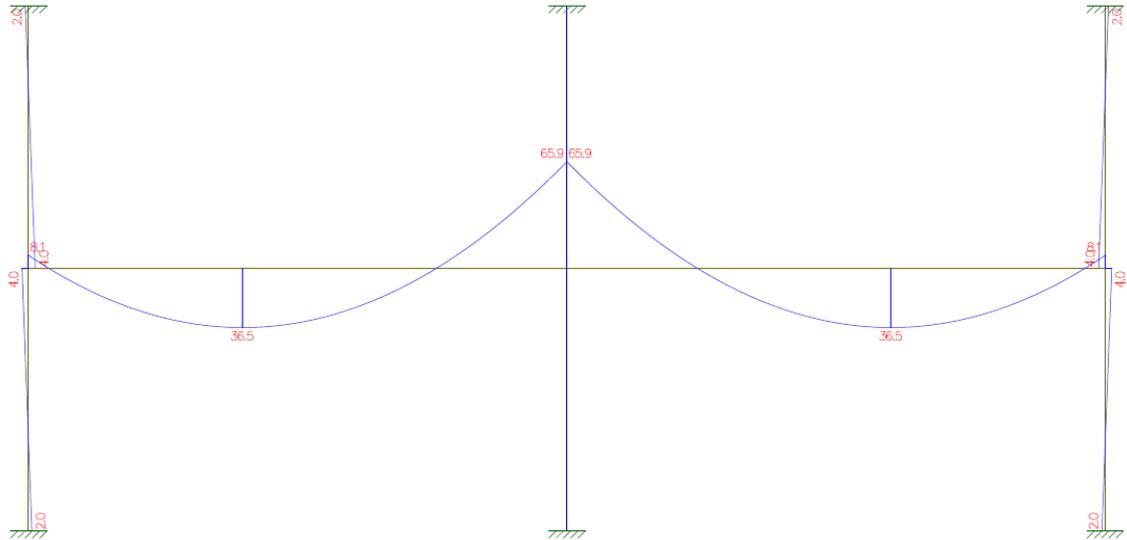
Fonte: Autora, 2020.

Figura 23 - Vigas 01, 03 04 e 05 com carregamento calculado para fins esportivos.



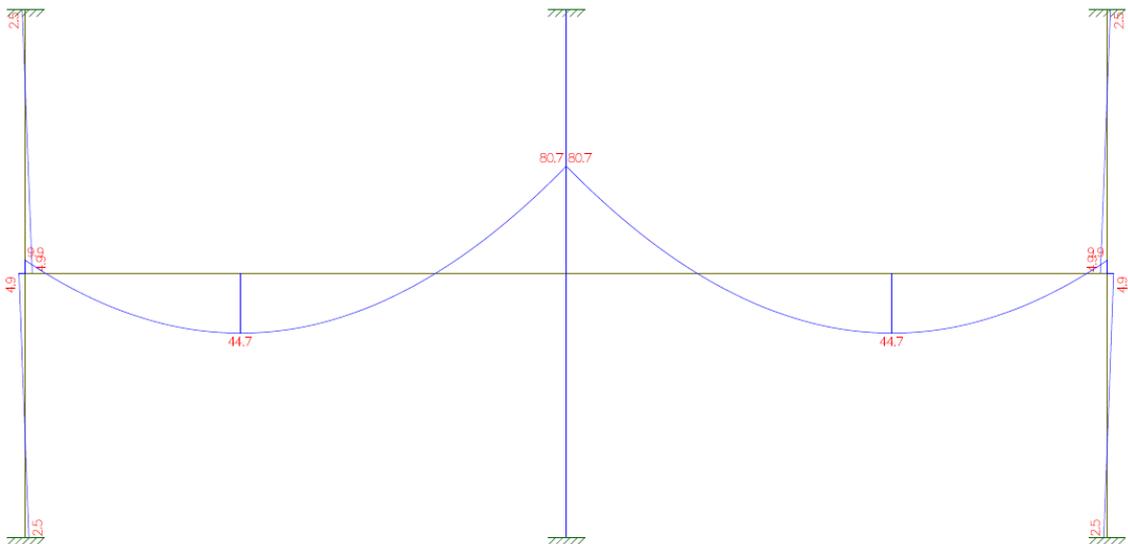
Fonte: Autora, 2020.

Figura 24- Diagrama de momento fletor das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de uso residencial.



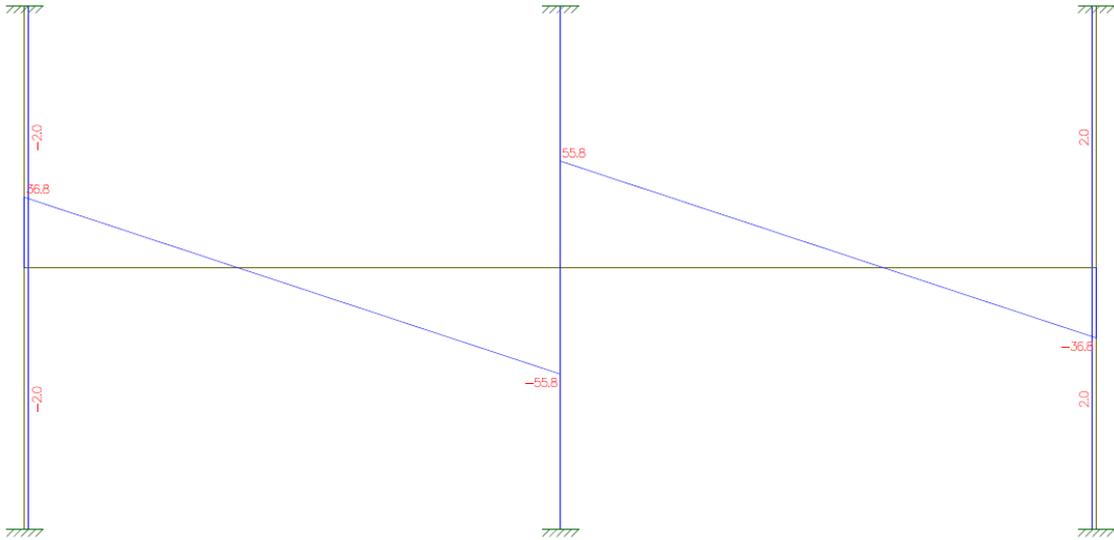
Fonte: Autora, 2020.

Figura 25 - Diagrama de momento fletor das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de fins esportivos.



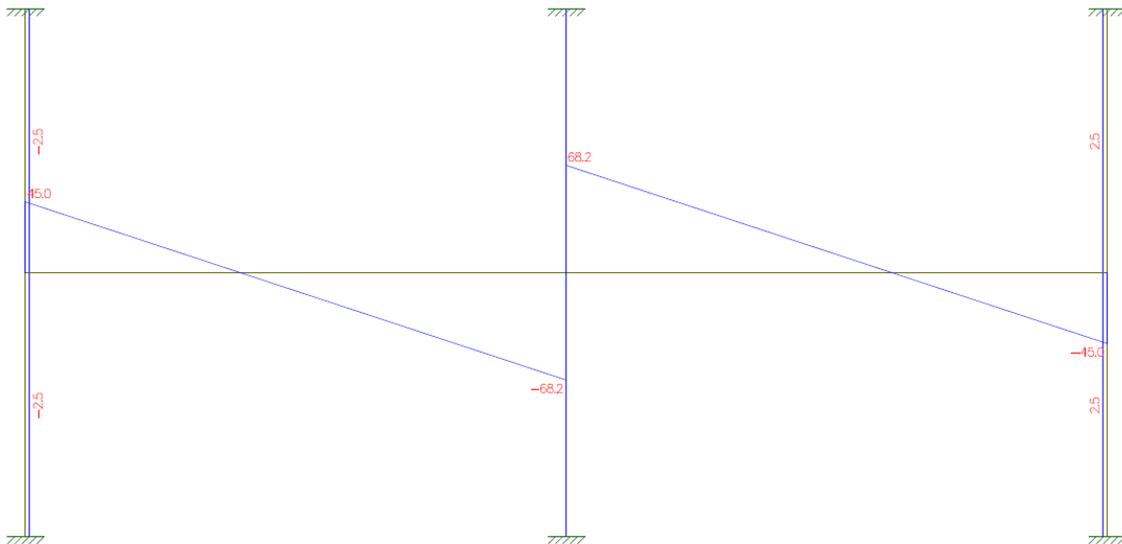
Fonte: Autora, 2020.

Figura 26 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de uso residencial.



Fonte: Autora, 2020.

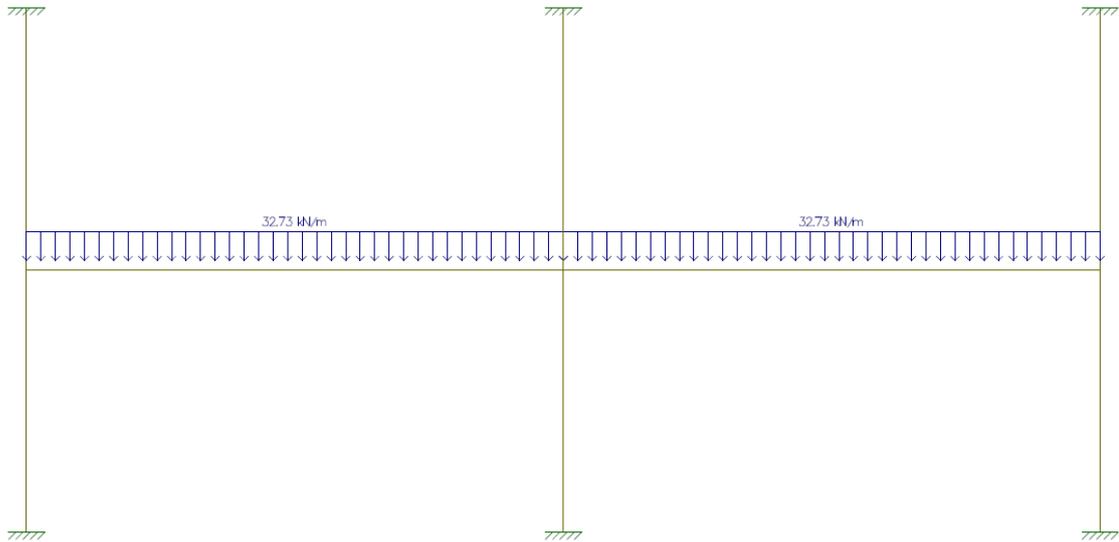
Figura 27 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 01, 03, 04 e 05 para o carregamento de fins esportivos.



Fonte: Autora, 2020.

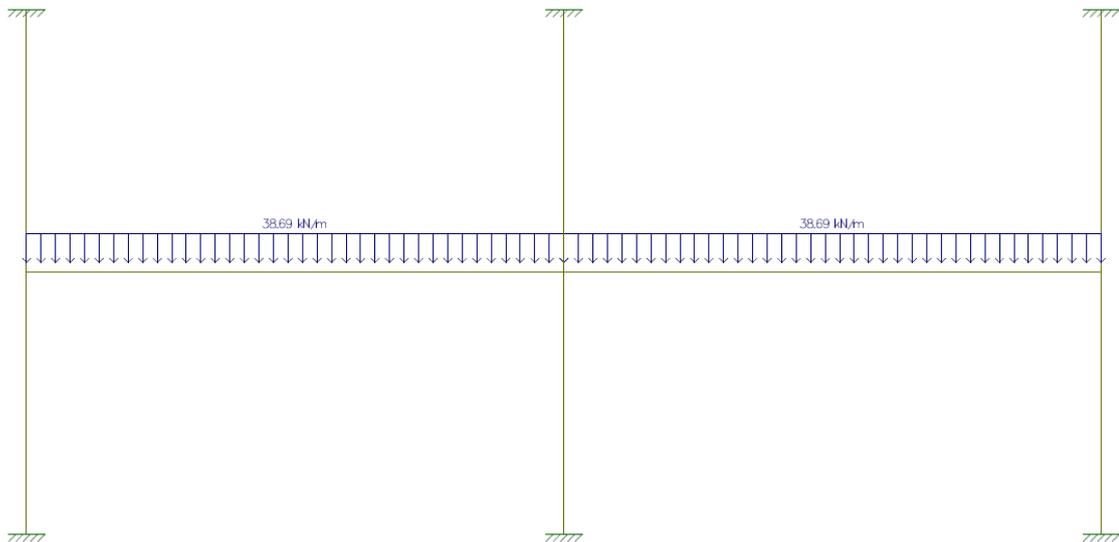
➤ *Vigas 02 e 06*

Figura 28- Vigas 02 e 06 carregamento calculado para uso residencial.



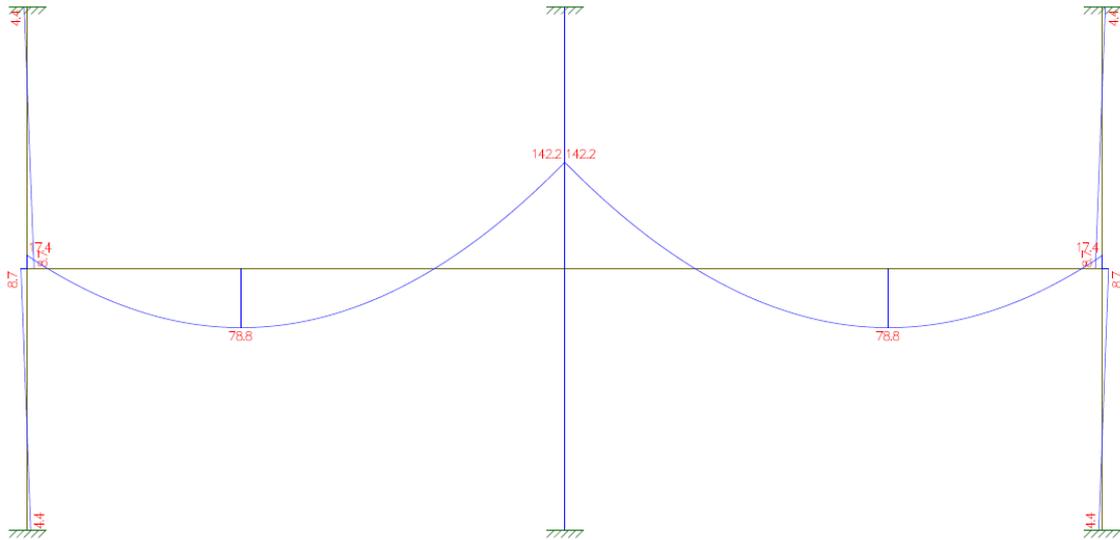
Fonte: Autora, 2020.

Figura 29 - Vigas 02 e 06 com carregamento calculado para fins esportivos.



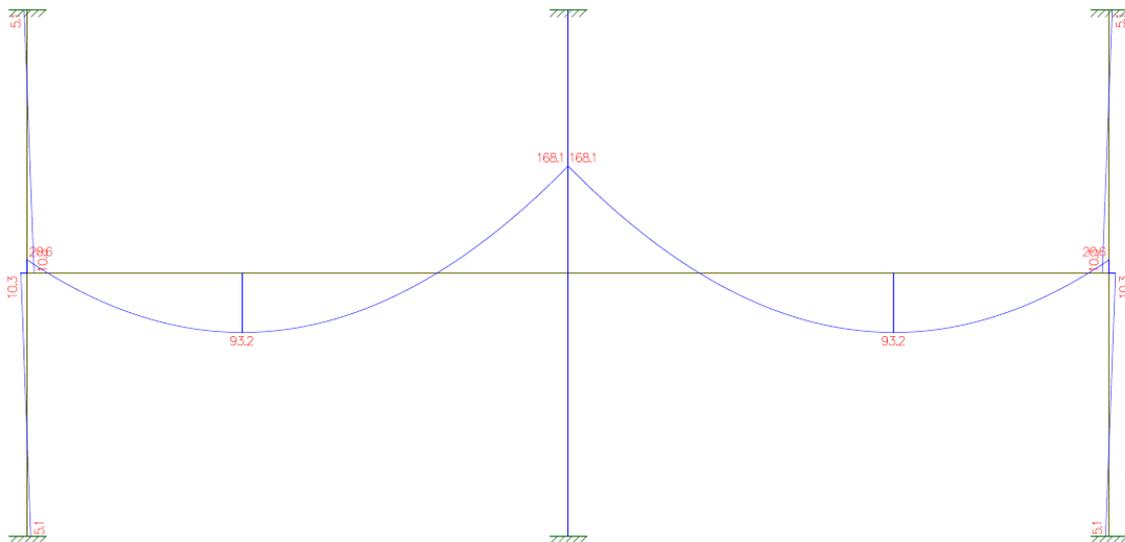
Fonte: Autora, 2020.

Figura 30 - Diagrama de momento fletor das vigas 02 e 06 para o carregamento de uso residencial.



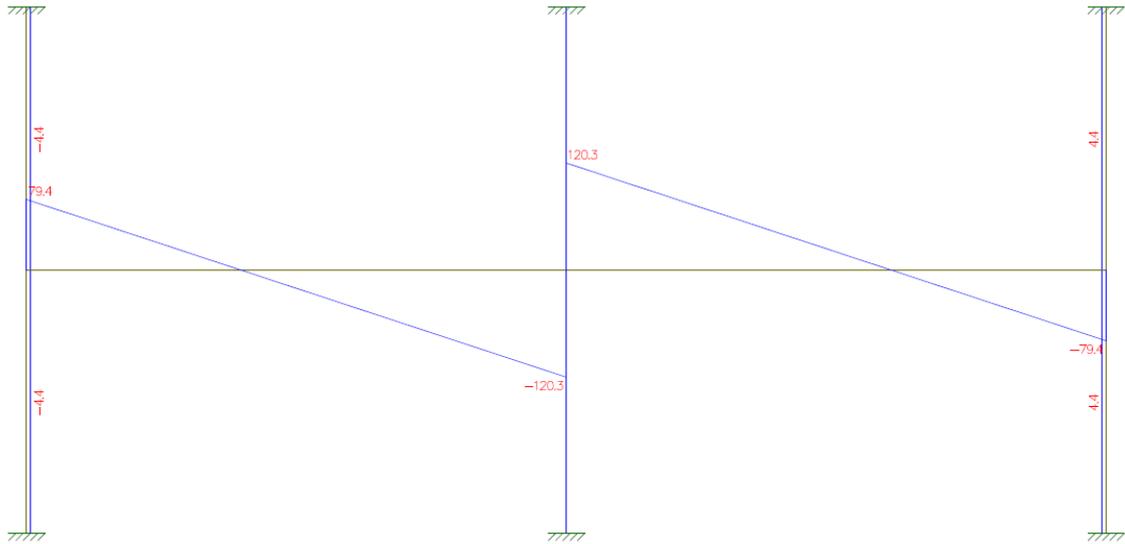
Fonte: Autora, 2020.

Figura 31 - Diagrama de momento fletor das vigas 02 e 06 para o carregamento de fins esportivos.



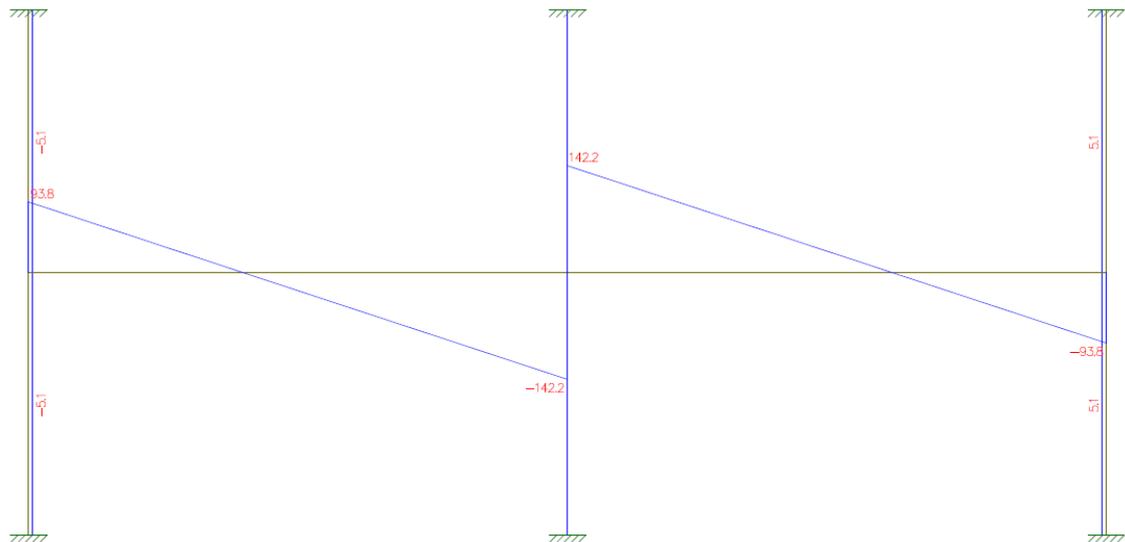
Fonte: Autora, 2020.

Figura 32 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 02 e 06 para o carregamento de uso residencial.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 33 - Diagrama de esforços cortantes das vigas 02 e 06 para o carregamento de fins esportivos.



Fonte: Autora, 2020.

A partir dos diagramas apresentados acima e seguindo as recomendações de cálculo da NBR 6118 (2014), foram encontrados os valores constantes nos quadros abaixo, que sintetizam de forma clara os elementos que necessitam de aumento da área de aço para portar os carregamentos futuros.

Quadro 2 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias à flexão para as vigas 01, 03, 04 e 05.

CARREGAMENTO	Carga (KN/m)	$M_{d+}$ (KN.m)	$A_s$ (calculada) $\text{cm}^2$	$A_{s,ef}$ (adotada) $\text{cm}^2$	Barras para momento positivo máximo	$M_{d-}$ (KN.m)	$A_s$ (calculada) $\text{cm}^2$	$A_{s,ef}$ (adotada) $\text{cm}^2$	Barras para momento negativo máximo
USO RESIDENCIAL	15,17	3650	2,27	2,50	2 Ø12,5mm	6590	4,27	5,00	4 Ø12,5mm
FINS ESPORTIVOS	18,56	4470	2,78	3,75	3 Ø12,5mm	8070	5,23	6,25	5 Ø12,5mm

Fonte: Autora, 2020.

Quadro 3 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias ao cisalhamento para as vigas 01,03, 04 e 05.

CARREGAMENTO	Vsd,máx (KN)	$A_{sw}$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ )	Barras para cisalhamento
USO RESIDENCIAL	53,91	0,01282	Ø6.3mm c/30
FINS ESPORTIVOS	65,88	0,01282	Ø6.3mm c/30

Fonte: Autora, 2020.

Quadro 4 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias à flexão para as vigas 02 e 06.

CARREGAMENTO	Carga (KN/m)	$M_{d+}$ (KN.m)	$A_s$ (calculada) $\text{cm}^2$	$A_{s,ef}$ (adotada) $\text{cm}^2$	Barras para momento positivo máximo	$M_{d-}$ (KN.m)	$A_s$ (calculada) $\text{cm}^2$	$A_{s,ef}$ (adotada) $\text{cm}^2$	Barras para momento negativo máximo
USO RESIDENCIAL	32,72	7880	5,11	6,25	5 Ø12,5mm	14220	10,32	11,25	9 Ø12,5mm
FINS ESPORTIVOS	38,69	9320	6,28	7,50	6 Ø12,5mm	16810	12,64	13,75	11 Ø12,5mm

Fonte: Autora, 2020.

Quadro 5 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias ao cisalhamento para as vigas 02 e 06.

CARREGAMENTO	Vsd,máx (KN)	$A_{sw}$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}$ )	Barras para cisalhamento
USO RESIDENCIAL	116,21	0,02550	Ø6.3mm c/24
FINS ESPORTIVOS	137,37	0,03551	Ø6.3mm c/17

Fonte: Autora, 2020.

Quadro 6 - Levantamento de cargas e armaduras necessárias para as lajes.

CARREGAMENTO	Carga (Kgf/m <sup>2</sup> )	$M_{d+}$ (Kgf.m/m)	Área de aço - direção x e y (cm <sup>2</sup> )	Barras para momento positivo nas duas direções	$M_{d-}$ (Kgf.m/m)	Área de aço - direção x e y (cm <sup>2</sup> )	Barras para momento negativo nas duas direções
USO RESIDENCIAL	625	635,9	2,04	Ø6.3mm c/14	1652,38	5,51	Ø10.0mm c/14
FINS ESPORTIVOS	925	941,12	3,02	Ø6.3mm c/10	2445,51	8,48	Ø10.0mm c/9

Fonte: Autora, 2020.

Então, a partir do levantamento de cargas realizado pode-se concluir que as vigas 01, 03, 04 e 05 necessitarão de reforço com PRFC para os momentos máximos positivo e negativo, e também ao cisalhamento; as vigas 02 e 06 também serão reforçadas para os momentos máximos positivo e negativo, bem como ao cisalhamento. As lajes precisarão de reforço para ambos os momentos fletores máximos.

#### 5.4 Dimensionamento do reforço à flexão

##### 5.4.1 Vigas

Considerando-se a estrutura no estágio 2 de fissuração – quando as tensões de tração na maioria dos pontos abaixo da linha neutra têm valores maiores que o da resistência à tração característica do concreto – esse estágio, utilizado na verificação das peças em serviço, termina com o início da plastificação do concreto comprimido (MELO, 2019). Foram calculados a altura da linha neutra( $x_{II}$ ) e o momento de inércia da seção transversal( $I_{II}$ ), calculado a partir da posição da linha neutra, obtida igualando a zero o momento estático da seção transversal compatibilizada. No quadro abaixo, são disponibilizados os dados calculados:

Quadro 7 - Linha neutra e momento de inércia das vigas para o estádio 2.

Vigas 1, 3, 4 e 5		
<b>Linha neutra</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$x_{II}$	11,18 cm	15,07cm
<b>Momento de Inércia</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$I_{II}$	40108,96 cm <sup>4</sup>	66305,09 cm <sup>4</sup>
Vigas 2 e 6		
<b>Linha neutra</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$x_{II}$	16,53 cm	20,86cm
<b>Momento de Inércia</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$I_{II}$	76781,3 cm <sup>4</sup>	108109,93 cm <sup>4</sup>

Fonte: Autora, 2020.

Para o dimensionamento do reforço das vigas foram seguidas as recomendações citadas no item 3 deste trabalho, nas quais, após os resultados apresentados no quadro acima, foram calculadas as deformações iniciais das vigas levando-se em consideração apenas as cargas permanentes – peso próprio, peso da alvenaria e sobrecarga proveniente das lajes. No quadro abaixo são apresentadas as deformações iniciais encontradas para as vigas:

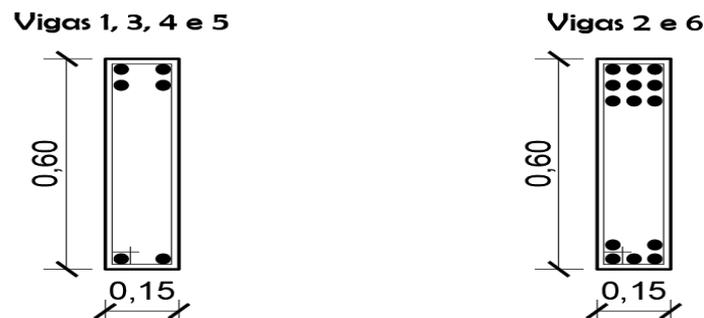
Quadro 8 - Deformações iniciais calculadas para as vigas.

Vigas 1, 3, 4 e 5		
<b>Deformação</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$\varepsilon_{bi}$	0,001552	0,001559
Vigas 2 e 6		
<b>Deformação</b>	$M_{g+}$	$M_{g-}$
$\varepsilon_{bi}$	0,001032	0,00119

Fonte: Autora, 2020.

A figura abaixo ilustra a seção transversal das vigas e o quadro 9 apresenta os parâmetros utilizados para o dimensionamento do reforço necessário.

Figura 34- Seção transversal das vigas (dimensões em metro).



Fonte: Autora, 2020.

Quadro 9 - Dados para dimensionamento do PRFC para as vigas.

Dado	Valor	Unidade
<b>Concreto</b>		
$f_{cd}$ ( $f_{ck} = 25$ MPa)	1,786	KN/cm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{cu}$	0,0035	-
$\lambda$	0,80	-
$\alpha_c$	0,85	-
<b>Aço</b>		
$f_{yd}$	43,50	KN/cm <sup>2</sup>
$\varepsilon_{sd}$	0,010	-
$E_s$	21000	KN/cm <sup>2</sup>
<b>Armadura vigas 1, 3, 4 e 5</b>		
$A_{s+}$	2,50	cm <sup>2</sup>
$A_{s-}$	5,00	cm <sup>2</sup>
<b>Armadura vigas 2 e 6</b>		
$A_{s+}$	6,25	cm <sup>2</sup>
$A_{s-}$	11,25	cm <sup>2</sup>
<b>PRFC</b>		
$E_f$	22800	KN/cm <sup>2</sup>
$t_f$	0,0165	cm

Fonte: Autora, 2020.

A partir dos parâmetros apresentados acima, determinou-se os seguintes dados para dimensionamento do PRFC para as vigas 1, 3, 4 e 5:

Quadro 10 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 1, 3, 4 e 5.

<b>PRFC</b>	
$M_{d+}$	
Área de reforço	0,5580 cm <sup>2</sup>
Largura	33,84 cm
Número de camadas	3
$M_{d-}$	
Área de reforço	0,1440 cm <sup>2</sup>
Largura	8,70 cm
Número de camadas	1

Fonte: Autora, 2020.

Contudo, como sobre as vigas 1, 3, 4 e 5 existe alvenaria construída – mesmo após a mudança de uso – justamente onde seria realizado o reforço ao momento máximo negativo, foi pensado em uma estratégia para que houvesse reforço apenas no momento positivo (parte inferior da viga), de modo que seja suficiente para suportar as cargas tanto do momento positivo, quanto do negativo. Foi realizada uma redistribuição de momentos, nos quais, o momento negativo utilizado no dimensionamento do reforço foi o calculado para uso

residencial (apresentado no quadro 2), e o momento positivo foi aumentado, absorvendo a sobrecarga proveniente da diminuição do momento negativo. A partir do novo momento positivo, foram encontrados os seguintes resultados:

Quadro 11 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 1, 3, 4 e 5, com o momento positivo compatibilizado.

<b>PRFC</b>	
<b><math>M_{d+}</math></b>	
Área de reforço	0,7320 cm <sup>2</sup>
Largura	44,36 cm
Número de camadas	4

Fonte: Autora, 2020.

Com a compatibilização e aumento do momento positivo ocorreu, conforme esperado, o aumento da área de reforço necessária, como pode ser visualizado ao se comparar os quadros 10 e 11. Desse modo, estas vigas terão apenas reforço ao momento positivo. Foram encontrados os seguintes valores para as vigas 2 e 6:

Quadro 12- Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas vigas 2 e 6.

<b>PRFC</b>	
<b><math>M_{d+}</math></b>	
Área de reforço	0,0640 cm <sup>2</sup>
Largura	3,87 cm
Número de camadas	1
<b><math>M_{d-}</math></b>	
Área de reforço	0,8930 cm <sup>2</sup>
Largura	54,14 cm
Número de camadas	4

Fonte: Autora, 2020.

O resultado acima ilustra que as vigas 2 e 6 também necessitam de reforço à flexão, uma vez que, a armadura calculada para o uso residencial não é suficiente para suportar a sobrecarga adicional proveniente da mudança de uso. No caso do reforço ao momento positivo, será adotada largura superior, com 13 cm em uma camada. Em síntese, essas vigas também receberão reforço, as figuras abaixo ilustram as seções transversais das vigas reforçadas.

Figura 35 - Representação do reforço à flexão nas vigas.

Vigas 1, 3, 4 e 5



Vigas 2 e 6



Fonte: Autora, 2020.

#### 5.4.2 Lajes

Para as lajes foram levados em consideração os mesmos parâmetros apresentados e utilizados no cálculo do reforço para as vigas, com exceção às áreas de armadura, apresentadas no quadro abaixo:

Quadro 13 - Área de armadura das lajes para dimensionamento do reforço.

Armadura das lajes		
$A_{s+}(x \text{ e } y)$	2,04	cm <sup>2</sup> /m
$A_{s-}$	5,51	cm <sup>2</sup> /m

Fonte: Autora, 2020.

Tratando-se de uma estrutura no estágio 2 de fissuração, conforme dito no subitem anterior, encontrou-se os seguintes resultados para deformações iniciais:

Quadro 14 - Deformações iniciais calculadas para as lajes.

Lajes		
Deformação	$M_{g+}(x \text{ e } y)$	$M_{g-}$
$\varepsilon_{bi}$	0,001166	0,001271

Fonte: Autora, 2020.

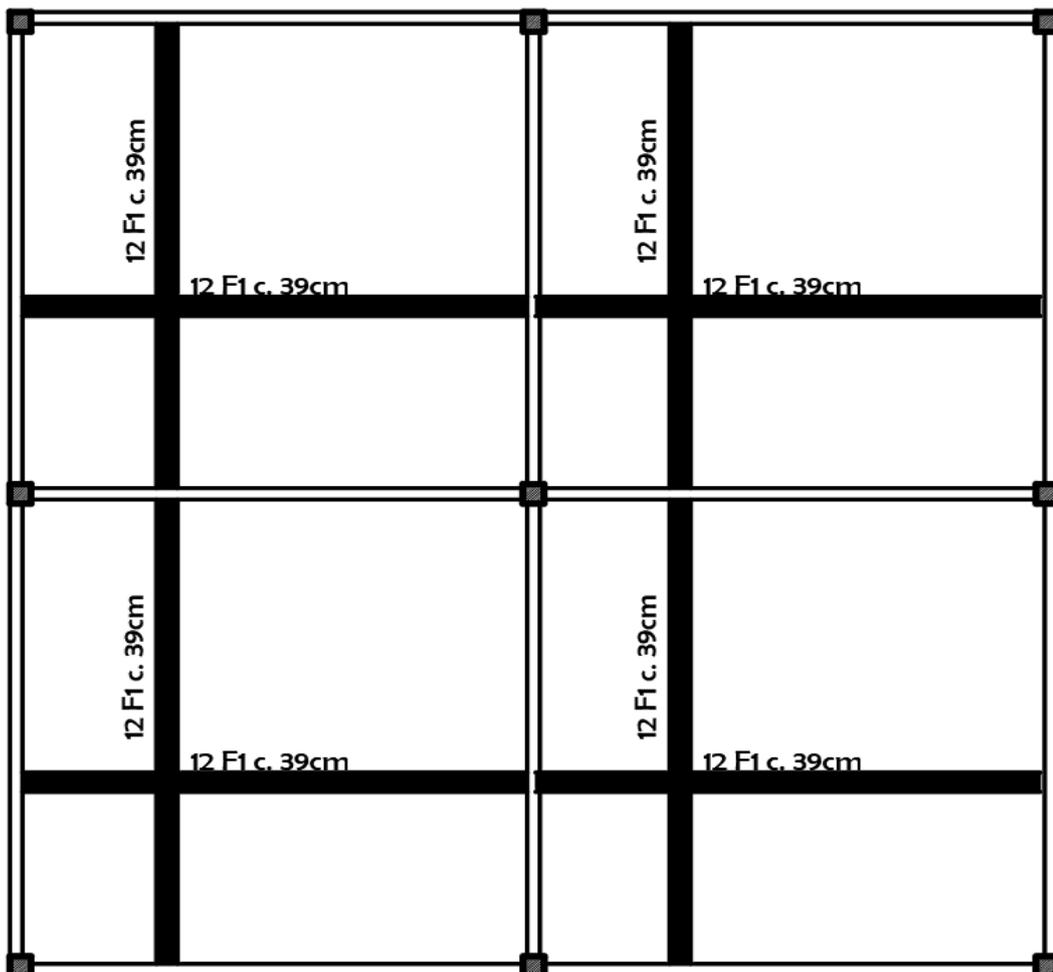
Desse modo, foi possível calcular a área de reforço necessária para as lajes, conforme apresentado abaixo. São ilustradas em seguida as representações da distribuição do reforço nas lajes.

Quadro 15 - Resultado do dimensionamento do reforço à flexão nas lajes.

PRFC	
$M_{d+} (x e y)$	
Área de reforço	1,20 cm <sup>2</sup> /m
Largura/m	73 cm/m
Largura/faixa	19 cm
Número de camadas	2
$M_{d-}$	
Área de reforço	0,5595 cm <sup>2</sup> /m
Largura/m	33,90 cm/m
Largura/faixa	17 cm
Número de camadas	1

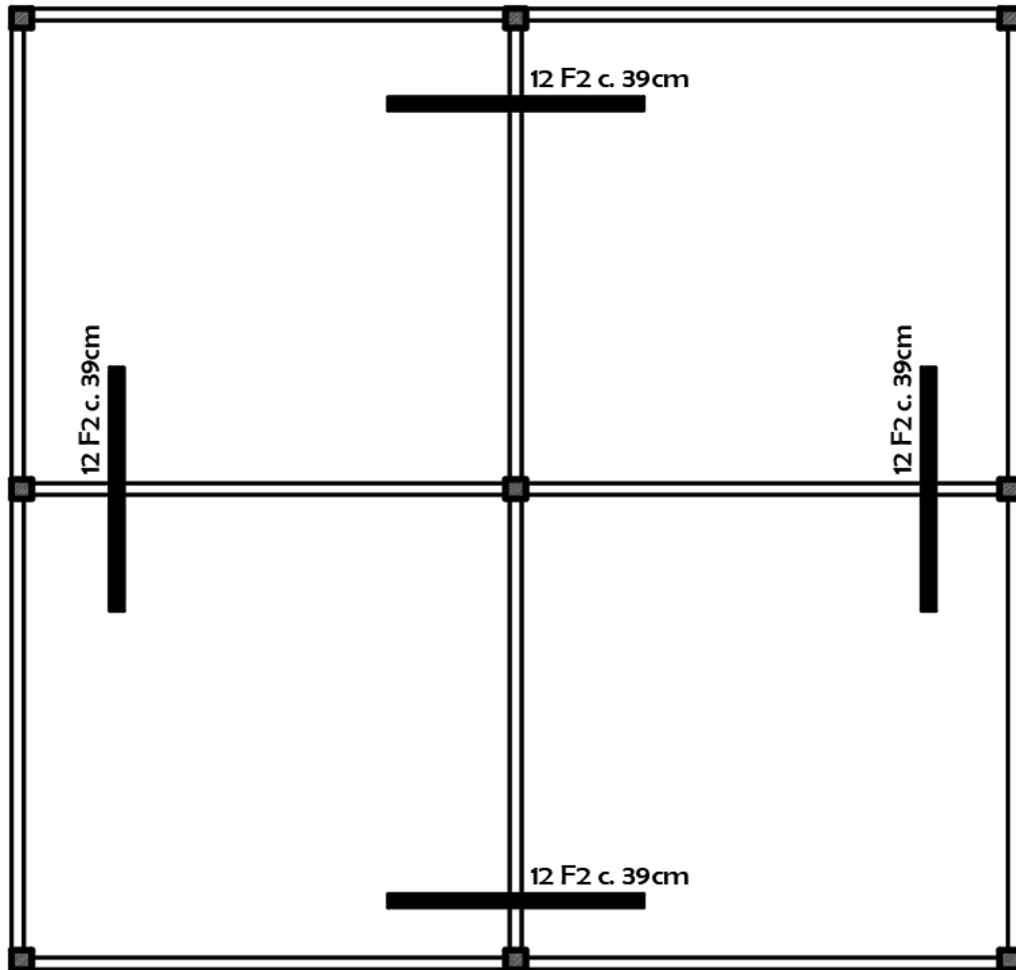
Fonte: Autora, 2020.

Figura 36 - Representação do reforço positivo dimensionado para as lajes.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 37 - Representação do reforço negativo dimensionado para as lajes.



Fonte: Autora, 2020.

onde,

➤ *F1*

Largura:  $19\text{cm}$

Comprimento:  $6\text{m}$

Espaçamento entre eixos:  $39\text{cm}$

➤ *F2*

Largura:  $17\text{cm}$

Comprimento:  $3,15\text{m}$

Espaçamento entre eixos:  $39\text{cm}$

## 5.5 Dimensionamento do reforço ao cisalhamento

### 5.5.1 Vigas

Levando-se em consideração as recomendações de cálculo apresentadas no subtópico 3.1.2, o qual apresenta um roteiro de cálculo e as verificações indicadas pelo ACI 440.2R-8 (2017), foi feito o dimensionamento do reforço das vigas ao cisalhamento.

A primeira verificação para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento é a capacidade resistente relativa às diagonais comprimidas, através da verificação se  $V_{Rd2} \geq V_{sd}$ . Para todas as vigas esta condição foi satisfeita, conforme pode ser visualizado no quadro abaixo:

Quadro 16 - Verificação da capacidade resistente das diagonais comprimidas.

<b>Vigas</b>	<b><math>V_{Rd2}</math></b>	<b><math>V_{sd}</math></b>
1, 3, 4 e 4	351,54 KN	65,88 KN
2 e 6	351,54KN	137,37KN

Fonte: Autora, 2020.

A capacidade resistente das armaduras de cisalhamento foi verificada através do Modelo de Cálculo I, conforme exposto no item 3.1.2, o qual determina o valor de  $V_{Rd3}$ , para, a partir dele determinar a carga para a qual o reforço será dimensionado ( $V_{fc}$ ), conforme quadro abaixo:

Quadro 17 - Capacidade resistente relativa à seção reforçada.

<b>Vigas</b>	<b><math>V_{fc}</math></b>
1, 3, 4 e 4	12,23 KN
2 e 6	82,58 KN

Fonte: Autora, 2020.

Abaixo os parâmetros definidos para o dimensionamento à cortante:

Quadro 18 - Parâmetros para dimensionamento à cortante.

Dado	Valor	Unidade
<b>Concreto</b>		
$f_{cd}$ ( $f_{ck} = 25$ MPa)	1,786	KN/cm <sup>2</sup>
<b>Aço</b>		
$f_{ywd}$	43,50	KN/cm <sup>2</sup>
$A_{sw}$ (vigas 1,3,4 e 5)	0,01282	cm <sup>2</sup> /cm
$A_{sw}$ (vigas 2 e 6)	0,02550	cm <sup>2</sup> /cm
<b>PRFC</b>		
Configuração	Tipo "U"	-
Orientação das fibras	90°	-
$E_f$	22800	KN/cm <sup>2</sup>
$t_f$	0,0165	cm
$\varepsilon_{fu}$	0,017	-
<b>Geometria</b>		
$b_w$	15	cm
$h$	60	cm
$d$	54	cm
$d_f$	46	cm

Fonte: Autora, 2020.

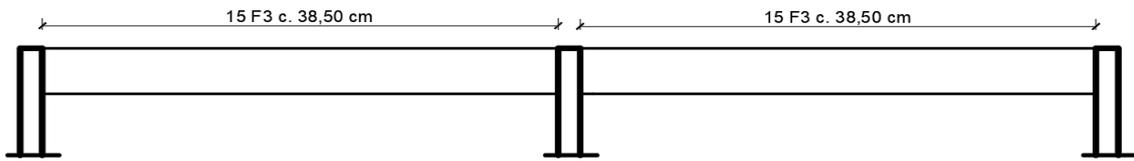
Então, a partir dos dados apresentados, o quadro abaixo apresenta o dimensionamento do reforço ao cisalhamento:

Quadro 19 - Resultado do dimensionamento do esforço cortante.

<b>PRFC - Vigas 1, 3, 4 e 5</b>	
Largura/Espaçamento	0,1206 cm <sup>2</sup> /cm
Número de camadas	1
Largura da tira	25 cm
Espaçamento	38,50 cm
<b>PRFC - Vigas 2 e 6</b>	
Largura/Espaçamento	0,8143 cm <sup>2</sup> /cm
Número de camadas	1
Largura da tira	25 cm
Espaçamento	30,00 cm

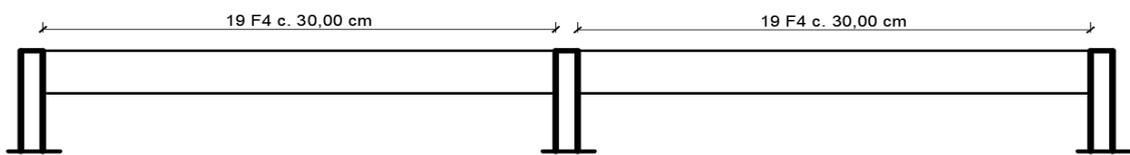
Fonte: Autora, 2020.

Figura 38- Representação do reforço ao cisalhamento das vigas 1, 3, 4 e 5.



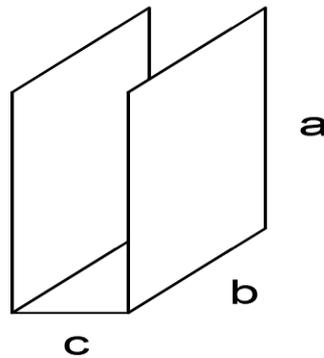
Fonte: Autora, 2020.

Figura 39- Representação do reforço ao cisalhamento das vigas 2 e 6.



Fonte: Autora, 2020.

Figura 40 - Detalhe das tiras de reforço ao cisalhamento.



Fonte: Autora, 2020.

onde,

➤  $F3$

Viga 1 = Viga 3 = Viga 4 = Viga 5

Espaçamento entre eixos: 38,50 cm

(a) =  $d_f = 46$  cm

(b) = 25 cm

(c) = 15 cm

Comprimento total = 107 *cm*

Camadas = 1

➤ *F4*

Viga 2 = Viga 6

Espaçamento entre eixos: 30,00 *cm*

(a) =  $d_f$  = 46 *cm*

(b) = 25 *cm*

(c) = 15 *cm*

Comprimento total = 107 *cm*

Camadas = 1

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho tratou-se do dimensionamento do reforço estrutural das vigas e lajes de um pavimento usando polímeros reforçados com fibras de carbono. Inicialmente foram apresentadas as propriedades físicas e mecânicas do material, técnicas adequadas de aplicação e um estudo sobre o dimensionamento à flexão e ao cisalhamento dos elementos estruturais do pavimento estudado.

Os mencionados polímeros reforçados com fibras de carbono são um composto que apresentam baixo peso específico e elevada resistência, o que confere leveza à peça reforçada, além de sua fácil e rápida aplicação, não requerendo interdições por longo tempo, como nos métodos convencionais. As recomendações para aplicação se direcionam basicamente para evitar falhas, principalmente na colagem do composto na peça estrutural, e orientar como proceder a preparação do substrato do elemento estrutural.

Apesar de ser uma técnica de uso recente, principalmente no Brasil, para reforço de estruturas, existem muitos trabalhos acerca da temática, especialmente em relação ao reforço de vigas de concreto. Nesses trabalhos da literatura são apresentadas diferentes estratégias para o dimensionamento do reforço estrutural, estudos experimentais, comportamento dos elementos estruturais reforçados, sobretudo seguindo as recomendações dos códigos americano e europeu, ACI 440.2R-8e o boletim 14 da *fib*, respectivamente.

Por fim, a partir do estudo de caso ilustrado neste trabalho foi possível descrever e ao mesmo tempo seguir os passos necessários para o dimensionamento do reforço do pavimento em questão. Foi possível aumentar a capacidade de carga da estrutura para seu novo uso, sem que houvesse alteração substancial nas suas dimensões ou aumento de peso. Observou-se que em todos os elementos estruturais analisados, onde constatou-se a necessidade de aumento de armadura devido ao aumento de sobrecarga, houve necessidade de reforço.

Como sugestão para trabalhos futuros e que pode complementar o conteúdo deste trabalho é o estudo e dimensionamento de pilares reforçados com fibras de carbono. Também como sugestão, o desenvolvimento de estudos sobre reforço de lajes nervuradas e a análise numérica do dimensionamento de diferentes angulações das tiras de reforço ao cisalhamento relacionando com a sua eficácia.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118.**Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 6120:**Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ADORNO, F. V., DIAS, F. O., SILVEIRA, J. da**Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Monografia - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R-8.**Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for strengthening concrete structures**. Farmington Hills, Estados Unidos, 2017.

ARAÚJO, I. N.. **Dimensionamento de reforço de elementos estruturais de concreto armado usando polímeros reforçados com fibras de carbono**. Monografia - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2014.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BARROS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão - parte 1: propriedades e técnicas**. Universidade do Minho, Braga, (sem data).

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BORGES, I. de O. **Estudo de reforço de vigas e lajes com Compósitos de Fibra de Carbono colados.** Monografia - Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

CURTY, L. A. **Estudo experimental dos consoles curtos de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de carbono.** Dissertação de Mestrado - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2009.

**FTOOL** - Programa gráfico-interativo para ensino do comportamento de estruturas. Versão educacional 3.0, 2019. Disponível em <https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftool/>. Acessado em maio de 2019.

JUVANDES, L. P., MARQUES, A. T., FIGUEIRAS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão.** Parte I. Universidade do Porto, 1996.

MACHADO, A. de. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acessado em 18 de junho de 2019. (sem data).

MELO, L. M. A. **Avaliação de deslocamentos em vigas de concreto com armaduras de aço e de polímeros reforçados por fibras.** Dissertação de mestrado - UFAL. Maceió, 2019.

MENEGHETTI, L., GARCEZ, M., SILVA FILHO, L. C. P. da. Viabilidade de aplicação de PRF de Carbono, Vidro e Aramida no reforço de estruturas de concreto armado. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, CBC2007 – 49CBC0407, Bento Gonçalves - Rio Grande do Sul, 2007. **Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto.** 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283711453\\_Viabilidade\\_de\\_aplicacao\\_de\\_PRF\\_de\\_carbono\\_vidro\\_e\\_aramida\\_no\\_reforco\\_de\\_estruturas\\_de\\_concreto\\_armado](https://www.researchgate.net/publication/283711453_Viabilidade_de_aplicacao_de_PRF_de_carbono_vidro_e_aramida_no_reforco_de_estruturas_de_concreto_armado). Acessado em 19 de fevereiro de 2020.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SILVA FILHO, J. J. H. **Reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono**. Tese de Doutorado - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, R. A., FERRARI, V. J. **Automatic design of the flexural strengthening of reinforced concrete beams using fiber reinforced polymers (FRP)**. Acta Scientiarum, pp. 157-165, 2012.