VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO EM FIBRA DE CARBONO EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

Carlos Eduardo Courradesqui de Araujo

Pós-graduando em Engenharia Estrutural pela UNISUAM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
carloscourradesqui@gmail.com

Eduardo Gullo de Assis

Pós-graduando em Engenharia Estrutural pela UNISUAM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
edugullo@gmail.com

Igor Charlles Siqueira Leite

Mestre em Engenharia Civil (UFRJ),
Professor do Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM – RJ) Rio de Janeiro, RJ, Brasil
igorcharlles@souunisuam.com.br

Niemeyer Torquetti Junior

Pós-graduando em Engenharia Estrutural pela UNISUAM, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
Niemeyer.torquetti@gmail.com

RESUMO

Ao longo dos anos, é comum que estruturas com vida útil mais avançadas apresentem anomalias e desgastes naturais, em sua maioria, provenientes da falta de manutenção. Contudo, a ineficiência do comportamento estrutural, não compete apenas à falta de manutenção, como também está associada às falhas executivas, análises e verificações estruturais errôneas ou uma alteração na utilização da edificação, provocando um acréscimo de carregamento não previsto inicialmente na etapa de concepção do modelo estrutural. Desse modo, se faz necessário a intervenção da estrutura, visando reabilitar o comportamento estrutural de forma satisfatória através da técnica de reforço estrutural. O presente trabalho teve por objetivo a verificação de segurança de uma estrutura em concreto armado e apresentação de solução proposta em fibra de carbono. O estudo se inicia com uma breve revisão bibliográfica sobre o conceito de reforço estrutural em fibra de carbono. Seguidamente é explanado o estudo de caso, apresentando as características da edificação, prospecções realizadas *in loco* para levantamento de informações necessárias a continuidade do trabalho, prosseguindo então com a verificação de segurança e capacidade resistente dos elementos. Apresentando por fim, o dimensionamento do reforço estrutural em fibra de carbono. Com isto pretende-se apresentar, de uma maneira prática, o estudo de caso, as etapas e critérios de verificação de segurança estrutural bem como o dimensionamento do reforço estrutural em fibra de carbono.

Palavras-chave: Reforço Estrutural; Fibra de Carbono; Estrutura de Concreto Armado, Verificação de Segurança.

SAFETY VERIFICATION AND SIZING OF CARBON FIBER REINFORCEMENT IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

ABSTRACT

Over the years, it is common for structures with more advanced lifespans to present anomalies and natural wear, mostly due to lack of maintenance. However, the inefficiency of the structural behavior is not only due to the lack of maintenance, but is also associated with executive failures, erroneous previous analyzes and verifications or a change in the use of building, causing an increase in unforeseen loading of design stage in a structural model. That way, it's necessary the intervention of the structure, aiming to rehabilitate

the structural behavior in a satisfactory way through the technique of structural reinforcement. The present work aimed to verify the safety of a reinforced concrete structure and to present a proposed solution in carbon fiber. The study begins with a brief bibliographical review on the concept of structural reinforcement in carbon fiber. The case study is then explained, adding the characteristics of the building, surveys carried out in loco to gather information necessary for the continuity of the work, then proceeding with the verification of the safety and resistance capacity of the elements. Finally, presenting the dimensioning of the structural reinforcement in carbon fiber. With this, it is intended to present in a practical way, the case study, the steps and criteria of verification of structural safety, as well as the dimensioning of the structural reinforcement in carbon fiber.

Keywords: Structural reinforcement; Carbon fiber; Concrete structure; Security check.

1. INTRODUÇÃO

Por definição, na construção civil, o reforço estrutural é caracterizado pela intervenção em uma estrutura existente, aumentando sua capacidade resistente antes de atingir o seu estado-limite. Tais reforços podem ser executados por técnicas e procedimentos distintos, porém o objeto de estudo deste presente artigo é apresentar a técnica de reforço estrutural por fibra de carbono em uma laje de uma edificação já existente.

Apesar do alto custo do material em si, a tomada de decisão por tal escolha se justifica por ser material com extraordinária resistência mecânica, possuir bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, elevada resistência a ataques químicos diversos, não são afetados pela corrosão (produto inerte), possui estabilidade térmica e reológica e extrema leveza, devido ao baixo peso específico do sistema (de $1,6\text{g/cm}^3$ à $1,9\text{g/cm}^3$, cerca de 5 vezes menor do que o aço estrutural).

Outro fator condicionante e que acaba reduzindo o custo final de tal técnica de reforço é o tempo e a facilidade de execução da mesma, que neste caso justifica-se pela aplicação em uma construção já edificada. Este edifício possui em sua totalidade, grande parte dos projetos complementares executados (hidráulica, elétrica, rede, incêndio e outros), além disso, quase todas as lajes apresentam o teto rebaixado de gesso acartonado, desta maneira, esses fatores foram relevantes ao optar-se pela adoção da fibra de carbono, tornando sua execução mais simples, sem intervir de forma abrupta no que já foi executado.

Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi, após verificar as condições de segurança da estrutura, dimensionar o reforço estrutural com fibra de carbono de uma laje do pavimento tipo de uma edificação comercial de 7 pavimentos, em estrutura de concreto armado, localizada no município do Rio de Janeiro, RJ.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Revisão bibliográfica

2.1.1. Reforço estrutural

É importante ressaltar que existe uma diferença entre reparo estrutural e reforço estrutural. No reparo estrutural, o objetivo é o restabelecimento das características mecânicas iniciais (devolve-se à estrutura danificada sua capacidade resistente inicial). Já no reforço estrutural, o objetivo é o estabelecimento de características mecânicas superiores às iniciais, ou seja, a capacidade resistente da estrutura é aumentada.

As etapas do projeto de reparo ou reforço estrutural podem ser descritas como:

- a) Diagnóstico do problema e medidas emergenciais;
- b) Viabilidade do projeto;
- c) Investigação, ensaios não destrutivos ou semi-destrutivos;
- d) Reanálise, rigidez – redistribuição;
- e) Seleção da técnica e dos materiais de reparo ou reforço;
- f) Projeto, cálculo e detalhamento;
- g) Execução e controle de qualidade.

2.1.2. FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono são resultado do tratamento térmico, a carbonização, de fibras precursoras orgânicas tais como o poliácridonitril (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e, também, através de fibras de rayon. O processo de fabricação consiste na oxidação dessas fibras precursoras seguidas de um, processo a altas temperaturas, podendo variar de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono e até 3000°C para fibras de grafite.

Com o processo térmico, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que oferece extraordinária resistência mecânica ao produto final.

Quanto maior a temperatura em que o processo é realizado, maior será o módulo de elasticidade do material final, que pode variar de 100GPa a 300GPa para fibras de carbono e até 650GPa para fibras de grafite. Quanto maior o módulo de elasticidade do material resultante,

maior seu custo. O produto com o módulo de elasticidade maior (grafite) pode custar cerca de 15 a 20 mais que o produto de fibra de carbono.

Figura 1 - Diagrama Tensão x Deformação das fibras

Fonte: (Manual VIAPOL)

O coeficiente de dilatação térmica dos compostos unidirecionais de carbono varia segundo suas direções longitudinal e transversal e dependem do tipo da fibra, da resina, e do volume de fibra de carbono

Tabela 1 - Coeficientes de dilatação das fibras de carbono.

Direção	Coeficiente de Dilatação Térmica
Longitudinal (α_L)	$-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 0
Transversal (α_T)	$22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

(Fonte: Autor)

O ACI 440 indica, genericamente, para sistemas compostos estruturados com fibra de carbono, CFC, as seguintes propriedades:

Tabela 2 – Características genéricas das fibras de carbono

Tipo de Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tensão (MPa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220-235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220-235	3.790 – 4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220-235	4.825-6.200	> 1,5
Alto módulo	354-515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515-690	> 2.410	> 0,2

Fonte: (Autor)

Os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono (CFC) são confeccionados com dois elementos distintos e fundamentais:

- a) A matriz polimérica, que tem a função de manter a estrutura que compõe as fibras de maneira coesa, de modo, a propiciar a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, concreto e fibra de carbono;
- b) O elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono. As fibras são arranjadas unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas e absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes.

Figura 2 - Esquema de um sistema de fibras de carbono.

Fonte: (Manual VIAPOL)

A matriz polimérica necessariamente tem que ter um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento que ocorre na fibra de carbono, para permitir que a mesma continue a possuir capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra ter atingido a sua tensão de ruptura. Para tanto, os sistemas compostos com fibras de carbono devem trabalhar segundo o critério fibra com ruptura frágil e matriz polimérica com ruptura dúctil.

Figura 3 - Diagramas tensão x deformação para matrizes poliméricas.

Fonte: (Manual VIAPOL)

A sequência para execução dos sistemas compostos com fibras de carbono pode ser resumida em:

- Recuperação do substrato de concreto armado para que o sistema possa ser aderido com segurança;

- Imprimação da superfície sobre a qual será aplicado o sistema para se estabelecer uma ponte de aderência entre o substrato de concreto e o sistema composto. Para tanto utiliza-se um imprimador epoxídico (primer) com elevado teor de sólidos que, ao penetrar nos poros do concreto e ao estabelecer uma película sobre a superfície do concreto, cria uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de concreto.
- Regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto, de modo a estabelecer um plano adequadamente nivelado. É utilizado uma pasta epoxídica contendo alto teor de sólidos para calafetar eventuais imperfeições superficiais e criar um plano desempenado para a aplicação do sistema composto.
- Aplicação da primeira camada de resina saturante com alto teor de sólidos que servirá para saturar a lâmina de fibra de carbono e aderi-la à superfície do concreto.
- Aplicação da lâmina de fibra de carbono que vai reforçar o composto.
- Aplicação da segunda camada de resina saturante para completar a impregnação da lâmina de fibra de carbono e acabando de conformar a matriz epoxídica que envelopa o sistema.
- Aplicação de maneira opcional de uma película de acabamento com alto teor de sólidos, alto brilho e resistência a corrosão, com a objetivo de proteção e/ou acabamento estético para o sistema.

Figura 4 - Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados de fibra de carbono.

(Fonte: Manual VIAPOL)

2.2. ESTUDO DE CASO

A edificação estudada no presente trabalho, trata-se de um prédio comercial de 7 pavimentos, situada no município do Rio de Janeiro. A estrutura é de concreto armado, com o prédio se dividindo em um subsolo, pavimento de acesso, 4 pavimentos tipo e cobertura, totalizando uma área total construída de aproximadamente 2.000 m².

O estudo se fez necessário pois houveram mudanças significativas em relação ao projeto inicial, na qual apresentava uma solução convencional, compreendendo um sistema em concreto armado com painéis de lajes maciças retangulares, vigas e pilares. Na revisão do projeto original, em especial nos pavimentos tipo e cobertura, houve a eliminação da maioria das vigas internas, passando-se a utilizar o sistema de lajes planas, aumentando a espessura das lajes e criando capitéis nos casos mais críticos. Esta nova solução foi empregada na construção da edificação.

Realmente, nas últimas décadas é comum obras prediais projetadas com a solução estrutural de pavimentos em laje plana (lisa). Comumente denominadas “lajes cogumelo”, as lajes planas (lisas) se distinguem dos sistemas tradicionais com a supressão de vigas e com a transferência de carga diretamente aos pilares, na forma de apoios discretos (pontuais). Não obstante as suas diversas vantagens técnicas e econômicas, do ponto de vista estrutural, lajes cogumelo vêm se tratar de uma solução mais sofisticada, exigindo um maior nível de recursos de projeto para um preciso controle do seu funcionamento, inclusive no que concerne o aspecto de deformabilidade dos pavimentos e de todo o conjunto.

Não foi disponibilizado o memorial de cálculo da nova solução e dentre os documentos disponíveis, foram identificados importantes divergências tais como detalhamento de armaduras dos elementos estruturais, locação de capitéis e disposições construtivas que não respeitam os critérios da boa prática de construção, o que ocasionalmente abre margem para um aumento de erros durante a etapa de execução.

Diante do exposto, fez-se necessário verificações numéricas afim de avaliar a segurança estrutural da edificação e, caso não atendesse aos seus respectivos estados limites preconizados por critérios normativos, seria dimensionado reforço estrutural.

Para tanto, a fim de se obter mais informações que complementassem as informações já em posse e tornassem as análises mais refinadas, foram feitas prospecções *in loco*, em locais estratégicos, identificando armaduras, seções dos elementos estruturais, cobrimento e espessura de revestimentos.

Figuras 5 e 6 - Prospecção para identificação de armaduras da laje

Fonte: (Autor)

2.3. Avaliação da segurança da estrutura

Para que se obtivesse uma visão mais ampla sobre a segurança da estrutura, houve a necessidade de realizar um trabalho mais amplo, com o processamento integral da mesma. Para tanto, utilizou-se o software TQS na versão V22.3, com a obtenção dos esforços considerando a discretização do pavimento com elementos de barra, ortogonais, configurando uma grelha.

A verificação de segurança da estrutura foi feita inicialmente considerando as condições normais de carregamento, seguindo as informações constantes nos desenhos do Projeto de arquitetura fornecidos pelo proprietário.

Em relação às cargas, as principais premissas adotadas nos estudos de verificação de segurança são as que se seguem:

A. Cargas Permanentes Adotadas (G)

- Peso Próprio → Calculado automaticamente pelo software considerando o peso específico do concreto de $2,50 \text{ tf/m}^3$.
- Contrapiso (pavimento tipo) → $0,10 \text{ tf/m}^2$, correspondente à espessura média de 5 centímetros.
- Piso elevado + Forro → $0,05 \text{ tf/m}^2$.
- Alvenarias Internas → $0,57 \text{ tf/m}$, correspondente à alvenaria de blocos de concreto de 9 cm de espessura e revestimentos em ambas as faces de 2,0 cm.
- Alvenarias Periféricas → $0,45 \text{ tf/m}$, correspondente à alvenaria de blocos de concreto de 14 cm de espessura e revestimentos em ambas as faces de 1,5 cm.

B. Cargas Acidentais Adotadas (Q)

- Pavimentos Tipo – $0,25 \text{ tf/m}^2$ em todo o pavimento.
- Cobertura – $0,40 \text{ tf/m}^2$ em todo o pavimento

Quanto aos materiais, consideramos:

- Concreto com resistência característica a compressão de 30 MPa (300 kgf/cm²), valor indicado nos desenhos do projeto estrutural;
- Aço com tensão de escoamento igual a 500 MPa ($f_{yk} = 5000 \text{ kgf/cm}^2$);

Foram adotadas as seguintes Normas Técnicas:

- ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- ABNT NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR 6123:1988 - Força devido ao vento em edificações
- ABNT NBR 8681:2004 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento;

2.4. Capacidade resistente das lajes

Para a determinação da capacidade resistente das lajes, foram consideradas, além dos materiais já informados, as armaduras detalhadas nos desenhos do projeto estrutural modificado. Foram definidas faixas de acordo com as armaduras existentes, conforme apresentado nas imagens seguintes.

Para cada uma das faixas foi calculada capacidade resistente da seção, comparando os valores desta forma obtidos com os resultantes do processamento, tanto para as cargas totais como apenas para as permanentes.

Figura 7- Armaduras positivas, sentido transversal.

Fonte: (Autor)

Figura 8 - Armaduras negativas, sentido transversal

Fonte: (Autor)

Figura 9 - Armaduras positivas, sentido longitudinal

Fonte:(Autor)

Figura 10 - Armaduras negativas, sentido longitudinal

Fonte: (Autor)

As tabelas a seguir apresentadas mostram os valores obtidos nos cálculos para a determinação da capacidade resistente das lajes.

Tabela 3 - Momentos Resistentes e Admissíveis das Lajes – Flexão Positiva, Sentido Transversal.

PAVIMENTO TIPO (2º, 3º, 4º)										
Direção	Local	Armadura Existente		f _{yk} (kgf/cm²)	f _{ck} (kgf/cm²)	b _w (cm)	d(cm)	A _s (cm²/m)	M _{res} (tf.cm/m)	M _{adm} (tf.cm/m)
		Ø (mm)	Espaçamento (cm)							
TRANSVERSAL	Flexão Positiva									
	Faixa 1A	10	12	5000	300	100	18,0	6,54	485,1	346,5
	Faixa 1B	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1
	Faixa 2A	12,5	18	5000	300	100	18,0	6,82	505,3	360,9
	Faixa 2B	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1
	Faixa 3A	12,5	16	5000	300	100	18,0	7,67	566,0	404,3
	Faixa 3B	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1
	Faixa 4A	12,5	16	5000	300	100	18,0	7,67	566,0	404,3
	Faixa 4B	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 5A	12,5	18	5000	300	100	18,0	6,82	505,3	360,9
	Faixa 5B	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1
	Faixa 6A	12,5	19	5000	300	100	18,0	6,46	478,7	341,9
	Faixa 6B	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1
	Faixa 7A	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 7B	10	12,5	5000	300	100	18,0	6,28	466,6	333,3
Faixa 8	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1	

Fonte: (Autor)

Tabela 4 - Momentos Resistentes e Admissíveis das Lajes – Flexão Negativa, Sentido Transversal

PAVIMENTO TIPO (2º, 3º, 4º)										
Direção	Local	Armadura Existente		f _{yk} (kgf/cm²)	f _{ak} (kgf/cm²)	b _w (cm)	d(cm)	A _s (cm²/m)	M _{res} (tf.cm/m)	M _{adm} (tf.cm/m)
		Ø (mm)	Espaçamento (cm)							
	Flexão Negativa									
	Faixa 1A	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 1B	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 2A	12,5	8	5000	300	100	18,0	15,34	1074,5	767,5
	Faixa 2B - Laje (face do capitel)	16	10	5000	300	100	18,0	20,11	1358,0	970,0
	Faixa 2B - Capitel (face do pilar)	16	10	5000	300	100	38,0	20,11	2866,8	2047,7
	Faixa 3A	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 3B	12,5	10	5000	300	100	18,0	12,27	878,3	627,4
	Faixa 4	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 5A	12,5	8	5000	300	100	18,0	15,34	1073,9	767,0
	Faixa 5B	16	8	5000	300	100	18,0	25,13	1630,6	1164,7
	Faixa 5C	10	19	5000	300	100	18,0	4,13	310,2	221,6
	Faixa 6A - Laje (face do capitel)	16	8	5000	300	100	18,0	25,13	1630,6	1164,7
	Faixa 6A - Capitel (face do pilar)	16	8	5000	300	100	38,0	25,13	3442,3	2458,8
	Faixa 6B	12,5	9	5000	300	100	18,0	13,64	965,2	689,4
	Faixa 6C	10	13	5000	300	100	18,0	6,04	449,6	321,2
	Faixa 7A	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 7B	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 8A	12,5	12	5000	300	100	18,0	10,23	742,7	530,5
	Faixa 8B - Laje (face do capitel)	12,5	7	5000	300	100	18,0	17,53	1208,7	863,4
	Faixa 8B - Capitel (face do pilar)	12,5	7	5000	300	100	38,0	17,53	2551,8	1822,7
	Faixa 9A	10	17,5	5000	300	100	18,0	4,49	336,8	240,6
	Faixa 9B	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 10	10	11	5000	300	100	18,0	7,14	526,9	376,4
	Faixa 11	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1

Fonte: (Autor)

Tabela 5 - Momentos Resistentes e Admissíveis das Lajes – Flexão Positiva e Negativa, Sentido Longitudinal

PAVIMENTO TIPO (2º, 3º, 4º)										
Direção	Local	Armadura Existente		f _{yk} (kgf/cm²)	f _{dk} (kgf/cm²)	b _w (cm)	d(cm)	A _s (cm²/m)	M _{res} (tf.cm/m)	M _{adm} (tf.cm/m)
		Ø (mm)	Espaçamento (cm)							
	Flexão Negativa									
	Faixa 1A	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 1B	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 2A	12,5	8	5000	300	100	18,0	15,34	1074,5	767,5
	Faixa 2B - Laje (face do capitel)	16	10	5000	300	100	18,0	20,11	1358,0	970,0
	Faixa 2B - Capitel (face do pilar)	16	10	5000	300	100	38,0	20,11	2866,8	2047,7
	Faixa 3A	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 3B	12,5	10	5000	300	100	18,0	12,27	878,3	627,4
	Faixa 4	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 5A	12,5	8	5000	300	100	18,0	15,34	1073,9	767,0
	Faixa 5B	16	8	5000	300	100	18,0	25,13	1630,6	1164,7
	Faixa 5C	10	19	5000	300	100	18,0	4,13	310,2	221,6
	Faixa 6A - Laje (face do capitel)	16	8	5000	300	100	18,0	25,13	1630,6	1164,7
	Faixa 6A - Capitel (face do pilar)	16	8	5000	300	100	38,0	25,13	3442,3	2458,8
	Faixa 6B	12,5	9	5000	300	100	18,0	13,64	965,2	689,4
	Faixa 6C	10	13	5000	300	100	18,0	6,04	449,6	321,2
	Faixa 7A	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 7B	10	10	5000	300	100	18,0	7,85	577,8	412,7
	Faixa 8A	12,5	12	5000	300	100	18,0	10,23	742,7	530,5
	Faixa 8B - Laje (face do capitel)	12,5	7	5000	300	100	18,0	17,53	1208,7	863,4
	Faixa 8B - Capitel (face do pilar)	12,5	7	5000	300	100	38,0	17,53	2551,8	1822,7
	Faixa 9A	10	17,5	5000	300	100	18,0	4,49	336,8	240,6
	Faixa 9B	10	14	5000	300	100	18,0	5,61	417,5	298,2
	Faixa 10	10	11	5000	300	100	18,0	7,14	526,9	376,4
	Faixa 11	10	9	5000	300	100	18,0	8,73	639,9	457,1

Fonte: Autor)

2.5. Verificação de segurança das lajes

A verificação de segurança das lajes foi realizada em duas etapas, com a primeira delas comparando os momentos fletores atuantes, oriundos da ação conjunta de todas as cargas, com

os momentos resistentes. O quociente resultante da divisão de ambos os valores é que indica o nível de segurança da seção em estudo.

A segunda etapa considerou a comparação dos momentos resistentes com os solicitantes resultantes da ação única das cargas permanentes. Esta comparação nos fornece o grau de segurança das lajes na situação atual, com apenas as cargas permanentes atuantes. Os valores estão representados pelos números na segunda coluna, da esquerda para a direita.

De fato, de acordo com a NBR 6118:2014, o esforço resistente de cálculo deve ser, no mínimo, igual ao esforço solicitante de cálculo, como se pode ver a seguir, em trecho extraído da própria norma.

Figura 11 - NBR 6118:2014.

12.5.2 Condições analíticas de segurança								
As condições analíticas de segurança estabelecem que as resistências não podem ser menores que as solicitações e devem ser verificadas em relação a todos os estados-limites e todos os carregamentos especificados para o tipo de construção considerado, ou seja, em qualquer caso deve ser respeitada a condição:								
$R_d \geq S_d$								
Para a verificação do estado-limite último de perda de equilíbrio como corpo rígido, R_d e S_d devem assumir os valores de cálculo das ações estabilizantes e desestabilizantes respectivamente.								
12.5.3 Esforços resistentes de cálculo								
Os valores de cálculo dos esforços resistentes são determinados a partir dos valores de cálculo das resistências dos materiais adotados no projeto, ou das tensões resistentes de cálculo, como definido em 12.3.1.								
Para aplicações específicas, ver Seções 17, 19 e 23.								
12.5.4 Esforços solicitantes de cálculo								
As solicitações de cálculo são calculadas, para a combinação de ações considerada, de acordo com a análise estrutural (ver Seção 14).								

Fonte: (ABNT, 2014)

No estado limite último (ELU), os coeficientes de ponderação das ações nas combinações normais estão definidos na Tabela 11.1 da NBR 6118, também reproduzida a seguir:

Tabela 6 - Reprodução da Tabela 11.1 da NBR 6118:2014

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0
<p>onde</p> <p>D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.</p> <p>^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.</p>								

Fonte: (ABNT, 2014)

Portanto, para combinações de ações normais, o quociente entre o esforço resistente de cálculo e o esforço solicitante característico deve ser maior ou igual a 1,4 para que esteja comprovada a segurança da seção em estudo.

Cabe, aqui, uma importante consideração o valor do coeficiente de ponderação das ações permanentes, principalmente em relação ao peso próprio da estrutura. No caso presente, considerando se tratar de uma estrutura pronta e confirmadas no local algumas medidas dos elementos, em especial a espessura das lajes, consideramos perfeitamente possível e seguro adotar o valor entre 1,20 e 1,25 para este coeficiente. De fato, ainda que as normas brasileiras não abordem esta situação com clareza, o Comité Euro-Internacional du Béton (CEB) e a Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) trataram deste assunto em alguns dos diversos boletins publicados na década de 1980, afirmando que os coeficientes de majoração das cargas permanentes adotados nas verificações de segurança de estruturas existentes deveriam ser inferiores aos usuais, exatamente por ser possível tomar as medidas reais dos elementos.

Assim procedendo, considerando o fator 1,25 para o peso próprio e 1,40 para as demais ações, a segurança estaria satisfeita com o quociente entre o esforço resistente de cálculo e o esforço solicitante característico sendo maior ou igual a 1,3, valor adotado nas tabelas apresentadas a seguir.

Na tabela 7, na coluna direita, as células coloridas de vermelho indicam a necessidade de intervenções para a utilização dos pavimentos com necessária segurança. Basicamente, as seções com deficiência de armaduras se referem à flexão positiva

Em relação à situação atual, com apenas as cargas permanentes atuando, as lajes apresentam suficiente segurança.

Como forma de descrever sucintamente os resultados, a tabela 7 apresenta apenas as faixas críticas, cujos valores estão abaixo do fator de segurança definidos por normas. As demais faixas atenderam satisfatoriamente a segurança para utilização prevista, não sendo necessário intervenções nestas regiões.

Tabela 7 – Segurança das lajes dos pavimentos Tipo – Sentido transversal

Direção	Local	f_{tk} (kgf/cm ²)	f_{yk}	f_{sk} (kgf/cm ²)	f_{sd}	b_w (cm)	d (cm)	A_s (cm ² /m)	a	ρ	β_1	β_2	M_{res} (tf.cm/m)	M_{sdl} (tf.cm/m)	M_{sl} (tf.cm/m)	M_{sl} (tf.cm/m)	M_{sdl}/M_{tk}	M_{res}/M_{sk}
TRANSVERSAL	Flexão Positiva																	
	Faixa 2A	5000	4347,83	300	214,29	100	18,0	6,82	23,87	0,0038	11,06	0,947	505,3	360,9	267,4	393,1	1,89	1,29
	Faixa 3A	5000	4347,83	300	214,29	100	18,0	7,67	23,87	0,0043	9,83	0,943	566,0	404,3	351,4	478,0	1,61	1,18
	Faixa 4A	5000	4347,83	300	214,29	100	18,0	7,67	23,87	0,0043	9,83	0,943	566,0	404,3	384,9	527,1	1,47	1,07
	Faixa 5A	5000	4347,83	300	214,29	100	18,0	6,82	23,87	0,0038	11,06	0,947	505,3	360,9	325,7	448,0	1,55	1,13

3. REFORÇO DAS LAJES (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

Conforme exposto no presente relatório, após verificação de segurança das lajes do pavimento tipo, constatou-se deficiências relevantes para flexão positiva em algumas regiões da laje, sendo recomendado intervenções nas mesmas.

Neste item será apresentado o memorial de cálculo para reforço das lajes do pavimento tipo com laminados de fibra de carbono. Como o procedimento segue no mesmo padrão nas demais faixas críticas do pano de laje, será apresentado o cálculo apenas da faixa 4A, no sentido de flexão positiva das armaduras transversais.

3.1.1. Materiais

- Concreto: $F_{ck} \text{ projeto} = 300 \text{ kgf/cm}^2$
 $F_{ck} \text{ ensaios} = 360 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow f_{cm,we} = 36 \times 1,20 = 43,2 \text{ MPa}$
- Aço: CA-50;
- Laminados CFRP $E \geq 165 \text{ GPa}$

3.1.2. Geometria

- Lajes em geral: $h = 22 \text{ cm} / d = 18 \text{ cm}$;
- Capitéis: $h = 42 \text{ cm} / d = 38 \text{ cm}$

3.1.3. Definição do momento resistente da seção de interesse

Antes de dimensionar o reforço em si, é necessário descobrir a seção resistente do elemento a qual está se analisando, para então ser comparado aos esforços solicitantes e verificar se o elemento atende ou não quanto aos critérios de segurança.

Sendo assim, para cálculo do momento resistente da seção de interesse, foi utilizada a metodologia abordada no livro (SANTOS, Lauro Modesto dos. **Cálculo de concreto armado** segundo a NB-1/76 e o CEB/72, São Paulo, Edgar Blucher, 1977.), e é apresentada logo abaixo:

$$M_{RES} = A_s f_y d \beta_z \quad (1)$$

Onde β_z é obtido por meio da tabela F1, correlacionando o valor de β_x , que se dá por:

$$\beta_4 = \frac{1}{\alpha\rho}, \text{ sendo: } \alpha = \frac{f_{yd}}{0,85f_{cd}} \text{ e } \rho = \frac{A_s}{bd} \quad (2,3 \text{ e } 4)$$

Com os dados das lajes já conhecidos, bem como a disposição das armaduras, as informações foram inseridas nas fórmulas e os resultados apresentados na Tabela 7.

3.1.4. Obtenção dos esforços via modelo computacional

Utilizou-se o software TQS na versão V22.3. A análise do comportamento estrutural dos pavimentos foi realizada através de modelos de grelha ou pórtico plano. Nestes modelos as lajes foram integralmente consideradas, junto com vigas e os apoios formados pelos pilares existentes

Os esforços obtidos dos modelos estruturais dos pavimentos foram utilizados para o dimensionamento do reforço à flexão e cisalhamento.

Figuras 12 e 13 - Modelagem 3D (a esquerda) e Pórtico unifilar espacial (a direita). Ambos obtidos através do software TQS v22.3

Fonte: (Autor)

Figura14 - Diagrama de momentos fletores característicos do pavimento tipo

Fonte: (Autor)

3.1.5. Definição dos reforços necessários (Faixa 4A)

$AS, \text{ exist} = \emptyset 12,5 \text{ C}/16 \text{ cm} = 7,67 \text{ cm}^2/\text{m}$

$MEK0 = 3,849 \text{ tfm}/\text{m} \rightarrow$ Momento fletor atuante no instante de implantação do reforço

$MEK = 5,27 \text{ tfm}/\text{m} \rightarrow$ Momento fletor solicitante característico

$MEd = 7,38 \text{ tfm}/\text{m} \rightarrow$ Momento fletor solicitante de cálculo

Adotando laminados 50 x 1,4 C/40 cm, têm-se:

$MRd = 10,16 \text{ tfm}/\text{m} > 7,38 \text{ tfm}/\text{m}$

$\sigma_{c, \text{máx}} = -15,87 \text{ MPa} < \sigma_{\text{lim}} = -21,6 \text{ MPa} \text{ (OK!)}$

$\sigma_{S, \text{máx}} = 384,45 \text{ MPa} < \sigma_{\text{lim}} = 400 \text{ MPa} \text{ (OK!)}$

$MEd, E = 2,00 \text{ tfm}/\text{m}$

$VEd, A = 13,96 \text{ tf}$

Resistência à Tração do Concreto:

De acordo com a NBR 6118:2014 $\rightarrow f_{ct} = 1/3 (f_{ck})^{2/3} = 3,21 \text{ MPa}$

EUROCODE 2004 $\rightarrow f_{ct} = 3,21 \text{ MPa}$

Adotado para $f_{csm} = 2,5 \text{ MPa}$ (tensão de aderência ao substrato)

$F_{fd, E} < F_{bd, \text{máx}} / 1,20 \rightarrow \text{OK!}$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos levantamentos de campo, nos resultados de ensaios e nos estudos feitos, pode-se chegar às seguintes conclusões quanto à segurança da estrutura das lajes dos pavimentos tipo para a atuação das cargas oriundas da utilização pretendida.

Antes de prosseguir, cabe ressaltar que houveram outras intervenções na estrutura, abordando outros elementos que não se limitassem às lajes, visto que durante as verificações, também se constatou resultados insatisfatórios para os mesmos.

Conforme resultados apresentados na Tabela 7, é notório a necessidade de reforços para flexão positiva no sentido transversal das lajes, tendo em vista que o fator de segurança fica bem inferior ao limite estipulado de 1,30, quando se compara o momento resistente das seções de interesses com os momentos fletores solicitantes característicos.

Já no caso da flexão positiva no sentido longitudinal, bem como os momentos fletores negativos em ambos os sentidos, não foram necessários dimensionamento de reforço, dado que a capacidade resistente das lajes é superior às solicitações de cálculo.

Dessa maneira, em virtude das limitações encontradas no local no que tange à evolução da obra em si, com instalações elétricas, instalações de dutos de ar condicionado e até rebaixo do teto com forro mineral já executadas, somadas as excelentes características mecânicas dos laminados, ainda que eles sejam mais adequados à reforços de flexão em elementos retilíneos, optou-se por solução o reforço estrutural em laminados de fibra de carbono.

Este estudo foi realizado também para despertar o interesse em engenheiros capacitados e ressaltar que o dimensionamento do reforço em fibra de carbono é uma solução inteiramente eficaz em estruturas de concreto armado, apresentam riscos menores de falhas executivas, fácil trabalhabilidade e acessível em determinadas situações. Ressaltando que, o dimensionamento do reforço estrutural bem como a execução deverão ser realizadas por profissionais qualificados, respeitando os limites impostos por normas técnicas e recomendações técnicas dos produtos utilizados.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118:2008, **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. ABNT, 2014.

_____. NBR 8800:2008, **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. ABNT, 2008.

_____. NBR 6120:2018, **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. ABNT, 2019.

_____. NBR 6122:2019, **Projeto e execução de fundações**. ABNT, 2019.

_____. NBR 6123:1988, **Força devido ao vento em edificações**. ABNT, 1988.

_____. NBR 8681:2004, **Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. ABNT, 2004.

MACHADO, ARI DE PAULA. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. VIAPOL, 2011.

SANTOS, LAURO MODESTO DOS. **Cálculo de concreto armado segundo a NB-1/76 e o CEB/72**. São Paulo. EDGAR BLUCHER, 1977.