

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Amanda Seixas Dornelles**

**VIABILIDADE DO EMPREGO DE CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS EM ELEMENTOS DE LAJE – ESTUDO DE  
CASO**

Porto Alegre  
Outubro de 2022

**AMANDA SEIXAS DORNELLES**

**VIABILIDADE DO EMPREGO DE CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS EM ELEMENTOS DE LAJE – ESTUDO DE  
CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

**Orientadora Vanessa Fátima Pasa Dutra**

Porto Alegre  
Outubro de 2022

**AMANDA SEIXAS DORNELLES**

**VIABILIDADE DO EMPREGO DE CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS EM ELEMENTOS DE LAJE – ESTUDO DE  
CASO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, outubro de 2022

**BANCA EXAMINADORA**

**Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

**Jean Marie Desir (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino (UNISINOS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais,  
por seu amor e apoio incondicionais.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço, primeiramente, à Deus, por me guiar e proteger sempre. Acredito que tudo na vida acontece por algum propósito e sou grata por Deus ter escrito a minha história dessa forma.*

*Agradeço aos meus pais, que sempre me incentivaram em cada passo que dei. Abdicaram de diversas coisas para si, em prol de proporcionar os melhores estudos a mim e aos meus irmãos. Sem eles nada disso teria sido possível.*

*Agradeço aos meus irmãos, que são minha grande motivação. Busco ser exemplo para eles e cada vitória minha é deles também.*

*Agradeço a todos os amigos que colecionei durante a vida e, em especial, aos que surgiram durante o curso de graduação. A vida tem um significado muito maior quando temos pessoas queridas com quem compartilhar. A jornada foi muito mais prazerosa ao lado dessas pessoas.*

*Agradeço a minha professora orientadora, Vanessa, por compartilhar comigo seu conhecimento e ser grande incentivadora desse trabalho. Foi uma honra desenvolver essa pesquisa ao lado de uma professora tão dedicada, que levo como inspiração.*

*Agradeço a todos os profissionais da área da educação com quem tive a oportunidade de adquirir conhecimento. Sou uma grande admiradora daqueles que dedicam sua vida a compartilhar com o próximo o seu conhecimento adquirido.*

*Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha formação, acadêmica e pessoal, e torceram por mim. Tenho certeza de que sou hoje a soma de aprendizados colhidos ao longo da estrada, com muitos erros e acertos na bagagem, e sou extremamente grata por isso.*

*“Não deixe que alguém saia da sua  
presença sem se sentir melhor e mais  
feliz.”*

***Madre Teresa de Calcutá***

## RESUMO

O setor da construção civil apresenta grande demanda por novas tecnologias construtivas e novos materiais que possibilitem as otimizações estruturais. O concreto é o material mais consumido dentro desse setor, tendo grande potencial para inovação. Surge, então, o Concreto Reforçado com Fibras (CRF) como uma alternativa para aprimorar as propriedades mecânicas do concreto simples. A adição de fibras na matriz cimentícia do concreto confere ao compósito maior capacidade resistente pós-fissuração, resistência à flexão e resistência ao impacto, além de fornecer um controle de fissuração, atuando como ponte de transferência de tensões, e aumento da capacidade de deformação pós-fissuração. Em decorrência destas propriedades, o consumo desse material teve um aumento significativo nos últimos anos, sendo mais comumente empregado em pisos industriais, revestimentos de túneis e reforços estruturais. Para a aplicação do CRF em elementos estruturais são necessários procedimentos normativos que garantam a segurança e o seu desempenho, definidos pelos objetivos do projeto estrutural. Apesar das normatizações mais antigas em outros países, a norma brasileira que abrange os procedimentos que devem ser adotados para o dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras, a ABNT NBR 16935:2021 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento (ABNT, 2021), foi lançada recentemente, em fevereiro de 2021, e os estudos que aplicam a sua metodologia ainda são escassos na literatura. Visto isso, o presente trabalho apresenta um estudo de caso da viabilidade do emprego de concreto reforçado com fibras em elementos de laje, utilizando os procedimentos normativos apresentados pela ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021). Para tanto, serão consideradas lajes e paredes de concreto com o reforço de fibras de aço e o método construtivo de paredes de concreto moldadas no local, utilizando, em conjunto, as premissas normativas da ABNT NBR 16055:2012 – Paredes de concreto moldadas no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos (ABNT, 2012).

**Palavras-chave:** Concreto reforçado com fibras, ABNT NBR 16935:2021, viabilidade de estruturas de concreto reforçadas com fibra, ABNT NBR 16055:2012, parede de concreto.

## ABSTRACT

The civil construction sector has a great demand for new construction technologies and new materials that allow structural optimizations. Concrete is the most consumed material within this sector, with great potential for innovation. Then, Fiber Reinforced Concrete (FRC) appears as an alternative to improve the mechanical properties of plain concrete. The addition of fibers in the concrete cementitious matrix gives the composite higher tensile strength, flexural strength, and impact strength, in addition to providing cracking control and improved post-cracking deformation capacity. Thus, the consumption of this material has increased significantly in recent years, being most commonly used in industrial floors, tunnel linings and structural reinforcements. For the application of the FRC in structural elements, normative procedures are necessary to guarantee the safety and performance of the project. Despite the older regulations in other countries, the Brazilian standard that covers the procedures that must be used for the design of fiber-reinforced concrete structures, ABNT NBR 16935:2021: Design of fiber-reinforced concrete structures – Procedure (ABNT, 2021), was published recently, in February 2021, and studies that apply its methodology are still scarce in the literature. Thus, this work presents a case study of the feasibility of using fiber reinforced concrete in slab elements, using the normative procedures presented by ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021). Therefore, the design of concrete slabs with the reinforcement of steel fibers and the constructive method of concrete walls casted in place, will be considered, using, together, the normative premises of ABNT NBR 16055:2012: Concrete walls casted in place for building construction – Requirements and procedures (ABNT, 2012).

**Keywords:** Fiber reinforced concrete, ABNT NBR 16935:2021, feasibility of fiber reinforced concrete structures, ABNT NBR 16055:2012, concrete wall.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos tipos de fibra .....	28
Figura 2 – Fibras dispersas aleatoriamente na matriz de concreto .....	30
Figura 3 – Representação da múltipla fissuração do CRF (a) e Representação da distribuição de tensões do CRF (b) .....	31
Figura 4 – Comparação do comportamento da matriz e da matriz reforçada com três tipos de fibra com características distintas .....	32
Figura 5 – Representação do CRF com compatibilidade de dimensões (A) e sem compatibilidade de dimensões (B) .....	33
Figura 6 – Comportamento carga x deflexão de um concreto convencional e do CRF .....	34
Figura 7 – Comportamento tensão x abertura de fissura para um CRF de mesma resistência e teores diferentes de fibra .....	35
Figura 8 – Comportamentos carga x deflexão para CRF com mesmo volume de fibra e resistência da matriz diferente .....	36
Figura 9 – Comportamento do CRF quando submetido a um ensaio de tração na flexão para os volumes de fibra crítico, abaixo e acima desse .....	37
Figura 10 – Comportamento <i>Softening</i> do CRF em tensão axial e Comportamento <i>Hardening</i> do CRF em tensão axial .....	38
Figura 11 – Sistemas construtivos Gethal (a) e Outinord (b) .....	40
Figura 12 – Percentual de utilização dos métodos construtivos, pesquisado em 39 diferentes construtoras no Brasil .....	42
Figura 13 – Forma Metálica .....	45
Figura 14 – Fôrmas Plásticas .....	45
Figura 15 – Fôrmas de Madeira .....	46
Figura 16 – Comparativo Reforço com Tela de Aço x Reforço com Fibra .....	47
Figura 17 – Ganhos e riscos da substituição do concreto armado pelo CRF .....	48
Figura 18 – Ilustração de reforço em estrutura de concreto armado (a) e CRF (b) .....	49
Figura 19 – Montagem de armaduras nos sistemas de parede de concreto armado (a) e CRF (b) .....	50
Figura 20 – Modelos de comportamento pós-fissuração: Rígido-plástico (a) e Linear (b) .....	54
Figura 21 – Ensaio de flexão a 3 pontos em prismas com entalhe inferior .....	55
Figura 22 – Curva força X deformação .....	56

Figura 23 – Definição do comprimento equivalente, conforme vinculações da parede .....	59
Figura 24 – Diagrama de tensão e deformação no ELU para momento fletor e força normal do CRF (a) e CA (b) .....	63
Figura 25 – Planta arquitetônica do edifício.....	72
Figura 26 – Método das Charneiras Plásticas.....	74
Figura 27 – Definição das lajes .....	75
Figura 28 – Vinculação das lajes nos bordos .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação para o uso do CRF .....	64
Tabela 2 – Resultados experimentais obtidos da literatura .....	71
Tabela 3 – Vãos efetivos das lajes .....	76
Tabela 4 – Altura das Lajes .....	79
Tabela 5 – Cargas devido à contribuição da escada .....	80
Tabela 6 – Ações nas lajes (kN/m <sup>2</sup> ).....	80
Tabela 7 – Reações nas lajes .....	82
Tabela 8 – Momentos Fletores das Lajes .....	84
Tabela 9 – Verificação das lajes quanto ao cisalhamento .....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas Maiúsculas

$A_s$	Área de aço da armadura
$A_{sl}$	Área de seção transversal da armadura que se estende além da seção considerada
$CMOD$	Medida da abertura do entalhe
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$F_{cr}$	Força de formação da fissuração
$F_j$	Carregamento correspondente ao $CMOD_j$
$F_{max}$	Força máxima
$M_{ad}$	Momento resistente de cálculo na armadura
$M_{EXP}$	Valor do momento obtido na ruptura do concreto
$M_n$	Momento nominal resistido pelo elemento linear
$M_{Rd}$	Momento resistente de cálculo
$M_{ud}$	Momento resistente de cálculo do CRF
$R_{cc}$	Força resultante do concreto comprimido
$R_{ct}$	Força resultante do concreto tracionado
$R_{st}$	Força resultante da armadura tracionada
$V_{EXP}$	Força cortante obtida experimentalmente no momento da ruptura do concreto
$V_f$	Volume de fibras
$V_{Rd}$	Força cortante resistida pelo elemento linear

$V_{Rd,F}$  Força cortante resistida pelo CRF

$V_{sw}$  Força cortante resistida pela armadura transversal

### **Letras Romanas Minúsculas**

$b$  Largura do corpo de prova

$b_w$  Menor largura da seção transversal na zona de tração

$c$  Cobrimento da armadura

$d$  Altura útil da seção transversal

$d_e$  Diâmetro equivalente da fibra

$d_f$  Diâmetro da fibra

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

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

$f_{cm}$  Resistência média à compressão do concreto

$f_{ct}$  Resistência do concreto à tração direta

$f_{ctk}$  Resistência característica do concreto simples à tração direta

$f_{ctm}$  Resistência média do concreto à tração direta

$f_{Fts}$  Resistência residual de serviço

$f_{Ftu}$  Resistência última

$f_{Ftud}$  Resistência de cálculo à tração direta do CRF, valor último

$f_{Ftuk}$  Resistência característica à tração direta do CRF, considerando  $w_u = 1,5mm$

$f_{Ftum}$  Resistência média à tração direta do CRF, valor último

$f_L$	Resistência à tração na flexão do CRF (limite de proporcionalidade)
$f_{Lk}$	Resistência característica à tração na flexão do CRF
$f_{Lm}$	Resistência média à tração na flexão do CRF
$f_R$	Resistência residual à tração na flexão do CRF
$f_{Rj}$	Resistência residual à tração correspondente ao CMOD <sub>j</sub>
$f_{R1}$	Resistência residual à tração na flexão do CRF, correspondente ao CMOD <sub>1</sub> = 0,5 mm
$f_{R2}$	Resistência residual à tração na flexão do CRF, correspondente ao CMOD <sub>2</sub> = 1,5 mm
$f_{R3}$	Resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>3</sub> = 2,5 mm
$f_{R4}$	Resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>4</sub> = 3,5 mm
$f_{R1k}$	Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>1</sub>
$f_{R2k}$	Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>2</sub>
$f_{R3k}$	Resistência residual característica à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>3</sub>
$f_{R1m}$	Resistência residual média à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>1</sub>
$f_{R2m}$	Resistência residual média à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>2</sub>
$f_{R3m}$	Resistência residual média à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>3</sub>
$f_{R4m}$	Resistência residual média à tração na flexão do CRF correspondente ao CMOD <sub>4</sub>
$f_{scd}$	Resistência de cálculo do aço à compressão
$h_{sp}$	distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova
$l$	Vão de ensaio do corpo de prova
$l^*$	Dimensão da laje
$l_c$	Comprimento crítico da fibra

$l_e$	Comprimento equivalente da parede
$l_f$	Comprimento da fibra
$l_x$	Menor vão da laje
$l_y$	Maior vão da laje
$n$	Número de bordas engastadas da laje
$t$	Espessura da fibra
$t_p$	Espessura da parede
$v_x$	Reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de $l_x$
$v_y$	Reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de $l_y$
$v'_x$	Reação na borda engastada perpendicular à direção de $l_x$
$v'_y$	Reação na borda engastada perpendicular à direção de $l_y$
$w$	Largura da fibra retangular
$w_u$	Valor da abertura da fissura no ELU

### **Letras Gregas**

$\gamma_c$	Coeficiente de ponderação do CRF
$\gamma_s$	Coeficiente redutor de resistência do aço
$\delta_u$	Deslocamento último correspondente à força última
$\delta_{PICO}$	Deslocamento de pico correspondente à carga máxima
$\delta_{ELS}$	Deslocamento de estado-limite de serviço de força obtida pela realização da análise linear com hipótese de não fissuração na condição inicial

$\varepsilon_{cu}$	Máxima deformação de compressão no CRF
$\varepsilon_{Fu}$	Deformação última do CRF
$\varepsilon_{su}$	Máxima deformação de tração no aço
$\varepsilon_y$	Deformação de tração da barra de aço longitudinal
$\eta_{d,resist}$	Resistência última à compressão por unidade de comprimento
$\theta_{exp}$	Ângulo do plano de ruptura à força cortante
$\lambda$	Índice de esbeltez da parede
$\lambda_f$	Fator de forma da fibra
$\mu_x$	Coefficiente de cálculo dos momentos fletores positivos na direção paralela à $l_x$
$\mu'_x$	Coefficiente para cálculo dos momentos fletores negativos atuantes na borda perpendicular à direção $l_x$
$\mu_y$	Coefficiente de cálculo dos momentos fletores positivos na direção paralela à $l_y$
$\mu'_y$	Coefficiente para cálculo dos momentos fletores negativos atuantes na borda perpendicular à direção $l_y$
$\rho$	Taxa geométrica da armadura longitudinal
$\rho_f$	Razão de volume das fibras
$\rho_m$	Razão de volume da matriz de concreto
$\sigma_{ct}$	Resistência a flexão do concreto reforçado com fibras
$\sigma_f$	Resistência das fibras
$\sigma_t$	Tensão de tração do concreto com fibra
$\sigma_y$	Tensão de tração desenvolvida na fibra no arrancamento



## SUMÁRIO

<b>1 Introdução</b> .....	<b>20</b>
1.1 Justificativa .....	22
1.2 Objetivos e Delimitações .....	23
1.3 Metodologia .....	24
1.4 Apresentação do Trabalho .....	25
<b>2 Concreto Reforçado com Fibras</b> .....	<b>27</b>
2.1 Interação Fibra-Matriz .....	29
2.2 Comportamento Mecânico do CRF .....	34
<b>3 Sistema Estrutural Parede/Laje em Concreto Reforçado com Fibras</b> .....	<b>39</b>
3.1 Projetos .....	43
3.2 Fôrmas.....	44
3.3 Concreto .....	46
3.4 Armadura .....	48
3.5 Execução .....	50
<b>4 Dimensionamento de Estruturas em Concreto Reforçado com Fibras</b> .....	<b>52</b>
4.1 ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (2014) .....	53
4.2 Código Modelo da <i>fib</i> (2012).....	54
4.3 ABNT NBR 16055: Paredes de Concreto Moldadas no Local para a Construção de Edificações – Requisitos e Procedimentos (2012).....	57
4.4 ABNT NBR 16935: Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras – Procedimento (2021).....	60
4.4.1 Cálculo da flexão simples no ELU .....	62
4.4.2 Cálculo da força cortante .....	66
4.4.3 Reforço mínimo para controle de fissuras .....	68
<b>5 Estudo de Caso</b> .....	<b>70</b>
5.1 Metodologia .....	70
5.2 Projeto Arquitetônico e Lançamento Estrutural .....	71
5.2.1 Lançamento Estrutural.....	72
5.3 Verificações .....	73
5.3.1 Pré-Dimensionamento .....	73
5.3.1.1 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas .....	74

5.3.1.2 Altura das Lajes .....	77
5.3.2 Dimensionamento .....	79
5.3.2.1 Cálculo das Ações.....	79
5.3.2.2 Reações .....	80
5.3.2.3 Solicitações de Flexão.....	82
5.3.2.4 Solicitações de Cisalhamento .....	86
<b>6 Análise de Resultados e Conclusões .....</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>90</b>



## 1. Introdução

Assim como outros setores da engenharia, a construção civil está em constante desenvolvimento através da busca por novas tecnologias construtivas e inéditos materiais que possibilitem as otimizações estruturais. O concreto convencional é, hoje, o material mais utilizado na construção civil, fundamentado pelas diversas vantagens por ele apresentadas, como: baixo custo, capacidade de se moldar, alta durabilidade e diversas possibilidades de produção (FIGUEIREDO, 2011, p. 1). Por outro lado, o concreto convencional é limitado pela sua reduzida capacidade de deformação, comportamento predominantemente frágil e sua baixa resistência à tração, que é em torno de, apenas, 7 a 11% de sua resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008, p. 71), fator este que faz essencial o emprego de armaduras quando o objetivo está relacionado ao uso estrutural.

O concreto armado (CA) surge, então, para aprimorar as desvantagens apresentadas pelo concreto simples. Utilizando-se de barras de aço, visando ao reforço do concreto, o CA apresenta um aumento na capacidade resistente, quando comparado ao concreto simples, e uma maior deformabilidade. Esses efeitos se devem ao fato de que o aço e o concreto atuam de modo associado entre si, estabelecendo mecanismos mais propícios para resistir aos esforços solicitantes. Nesse mesmo contexto, a utilização de elementos que atuam na melhoria do desempenho do concreto vem sendo muito estudada nos últimos tempos, a exemplo de aditivos e adições que podem, eventualmente, fornecer melhorias específicas para a mistura.

Assim, fica evidente o crescente interesse pelo uso das fibras como reforço do concreto, devido, principalmente, aos benefícios resultantes da incorporação destes filamentos na matriz do compósito, sobretudo quando avaliadas as propriedades físicas e mecânicas do concreto sem reforço. A saber, a adição de fibras na matriz cimentícia do concreto atua de modo a contribuir na diminuição da fragilidade do compósito, permitindo um aumento da deformabilidade pós-pico de tensão e uma maior absorção de energia de fraturamento (tenacidade) quando o material é submetido aos diferentes tipos de carregamentos. Além disso, vale destacar o auxílio para o controle da fissuração e do lascamento em situações agressivas decorrentes de incêndio (FIGUEIREDO, 2011, p. 132).

Quanto à sua classificação, as fibras podem ser do tipo microfibras, quando possuem diâmetro menor que 0,3mm, ou como macrofibras, quando possuem diâmetro superior a 0,3mm. As microfibras são utilizadas, principalmente, para o controle de fissuração e combate ao incêndio. Já as macrofibras além de auxiliarem no controle de fissuração, são utilizadas para melhoria do desempenho estrutural, funcionando como um reforço à matriz de concreto, fornecendo aumento na resistência do material, na absorção de energia e na ductilidade pós-fissuração. A adição de fibras na matriz cimentícia dá origem ao chamado Concreto Reforçado com Fibras (CRF).

O CRF apresenta mudança no comportamento mecânico, pois as fibras podem atuar como pontes de transferência de tensões através das fissuras existentes, desta forma, o concreto pode apresentar um comportamento pseudodúctil. Essa tecnologia representa agilidade no processo de concretagem, muitas vezes sendo uma ótima alternativa para casos em que o canteiro de obras possui pouco espaço disponibilizado para armazenamento ou em situações em que o acesso de equipamentos ao canteiro de obra é limitado. Além disso, nota-se um considerável ganho na resistência à flexão e controle de fissuração do concreto, além de reduzir ou até mesmo, em alguns casos, dispensar o trabalho de montagem de armadura que ocorre no concreto armado (Figueiredo, 2011, p. 129).

Utilizado já há vários anos no Brasil, com aplicações variadas, como concreto projetado para revestimento de túneis, concreto para revestimento de pavimentos ou na produção de tubos para saneamento (solicitados apenas por ações decorrentes do efeito de gravidade), o CRF ainda possui aplicações limitadas para uso estrutural. Pensando nos métodos de dimensionamento, para a utilização do concreto com o reforço de fibras é essencial acrescentar a parcela de contribuição das fibras na resistência da mistura. Porém, os modelos normativos disponíveis atualmente que dissertam sobre os elementos estruturais de concreto, como por exemplo a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento (ABNT, 2014), levam em consideração apenas a armadura do concreto por meio de barras longitudinais e transversais e a atuação do próprio concreto. Assim, tornam-se necessários modelos e especificações normativas que estudem a qualidade e fomentem a confiabilidade no que se refere à segurança da aplicação do CRF na construção civil, sendo esse um assunto que se apresenta como uma nova abordagem de aplicação e que está em constante desenvolvimento.

As primeiras orientações normativas brasileiras que remetem ao assunto surgiram em 2005, com a publicação da ABNT NBR 15305:2005 – Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro – Procedimentos para o controle de fabricação (ABNT, 2005). Mais tarde, em 2007, foram publicadas a ABNT NBR 15530:2007 - Fibras de aço para concreto - Especificações (ABNT, 2007) e a revisão da ABNT NBR 8890:2007 - Tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário - Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2007), que passou a mencionar o uso de fibras para reforço de tubos. Mais recentemente, em 2019, foi publicada a ABNT NBR 15530:2019 - Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2019). No entanto, tais normas não trazem especificações quanto ao dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras. As recentes publicações das normas ABNT NBR 16935:2021 - Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento (ABNT, 2021), ABNT NBR 16940:2021 - Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio (2021) e ABNT NBR 16938:2021 - Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade (2021), trazem um avanço na área e permitem projetar estruturas dispensando o uso de armaduras ou as substituindo parcialmente, devido à utilização das fibras.

Neste cenário, este trabalho propõe um estudo de caso da viabilidade do emprego de concreto reforçado com fibras em elementos de laje de um edifício residencial multifamiliar, utilizando como base as normas brasileiras vigentes.

## **1.1 Justificativa**

A tendência por novas tecnologias é visivelmente crescente nos últimos anos. Assim, percebe-se um crescente interesse no desenvolvimento e utilização de materiais que melhorem o desempenho do produto desenvolvido, como é o caso do concreto reforçado com fibras (CRF). Segundo Carnio (2017, p. 29), desde os anos 90 as fibras tiveram grande avanço de utilização no Brasil, uma vez que as possibilidades de aplicação desde material são vastas. Em conjunto, houve um avanço nas pesquisas sobre as propriedades mecânicas do material e a sua aplicação em elementos estruturais. Nesse cenário, tornam-se necessárias orientações

normativas que visam à qualidade e à segurança na aplicação da construção civil, norteados os procedimentos de dimensionamento.

No panorama mundial, existem recomendações normativas estabelecidas, como o Código Modelo da *fib* (2012), cujo principal objetivo é apresentar novos desenvolvimentos de estruturas de concreto, materiais estruturais e novas tecnologias, a fim de alcançar o comportamento ideal para as estruturas, além de servir de base para futuros códigos para estruturas de concreto. Esse Código Modelo contribuiu de maneira significativa no avanço de especificações técnicas para a elaboração de procedimentos para a utilização do CRF. Além de trazer um estudo sobre o ciclo de vida de uma estrutura de concreto, desde a sua concepção e construção até a demolição, o Código Modelo da *fib* (2012) também serviu de base para diversos procedimentos normativos nacionais e internacionais, incluindo as que tratam sobre o projeto e dimensionamento de estruturas de CRF.

No Brasil, foi publicada em fevereiro de 2021, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a ABNT NBR 16935:2021 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento. Esta norma apresenta os procedimentos para dimensionamento de elementos com CRF, estabelecendo um desempenho mecânico adequado para os mesmos. Uma vez que esta publicação ainda é recente, poucas pesquisas e poucos trabalhos são encontrados na literatura onde se verifica a aplicação dos seus procedimentos, justificando, assim, a importância do presente trabalho.

## **1.2 Objetivos e Delimitações**

O objetivo principal definido para a realização desse trabalho é realizar um estudo de caso da viabilidade do emprego de concreto reforçado com fibras em elementos de laje, utilizando os procedimentos normativos da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021). Para o resultado buscado, será utilizado, como modelo estrutural, um edifício residencial multifamiliar definido pela conexão de elementos de lajes e paredes constituídos em concreto reforçado com fibras. O estudo estará delimitado à análise das lajes do edifício, considerando a utilização de concreto reforçado com fibras de aço, não incluindo a avaliação dos demais elementos estruturais da edificação, como paredes e fundações. Não serão contemplados neste trabalho os projetos de fôrmas e escoramento. A não realização de ensaios para caracterização do concreto reforçado

com fibras a ser utilizado no dimensionamento também apresenta-se como uma das delimitações do trabalho, juntamente com o não dimensionamento da escada de concreto convencional.

Como objetivos secundários pretende-se:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o CRF e os procedimentos normativos brasileiros de dimensionamento de elementos estruturais compostos por esse material;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o sistema construtivo de paredes de concreto e seus procedimentos normativos de dimensionamento, uma vez que o sistema estrutural interfere diretamente no comportamento estrutural do edifício;
- Realizar o estudo de caso da viabilidade do emprego do concreto reforçado com fibras em elementos de laje de um edifício residencial, considerando o sistema construtivo de parede e laje de concreto moldados no local;

### 1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, serão contempladas as seguintes etapas:

- **Revisão bibliográfica:** a primeira etapa do trabalho contempla uma revisão da literatura e das normas técnicas especializadas relacionadas ao projeto e execução de estruturas de concreto reforçadas com fibra. Essa etapa tem por objetivo trazer um maior conhecimento sobre o tema e fundamentar a pesquisa, expondo a importância e vantagens da utilização da fibra no concreto. Ainda na revisão bibliográfica, será estudado o método executivo de paredes de concreto, trazendo suas particularidades, vantagens e comparações com outros métodos construtivos;
- **Estudo da normatização relacionada ao tema:** na segunda etapa do trabalho, serão estudadas as normas técnicas especializadas relacionadas ao projeto e execução do sistema construtivo de parede de concreto e do concreto reforçado com fibras. Para esta, foi dada especial atenção às normas ABNT NBR 16935:2021



(ABNT, 2021), ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012) e ao Código Modelo da *fib* (2012), uma vez que esse último é utilizado como base para diversos procedimentos normativos nacionais e internacionais tal como a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021);

- **Estudo de caso:** nessa etapa do trabalho, tem-se a apresentação e avaliação da planta arquitetônica do edifício e caracterização do sistema estrutural a ser utilizado. O propósito desta etapa está direcionado para a análise da viabilidade do uso de concreto reforçado com fibras em elementos de lajes. Para tanto, é realizada a verificação quanto ao pré-dimensionamento e dimensionamento e a análise do comportamento da estrutura tanto no Estado Limite Último (ELU), quanto no Estado Limite de Serviço (ELS). Em função dos resultados obtidos na análise estrutural, é avaliado se são necessárias armaduras complementares para os elementos.
- **Análise do estudo de caso e conclusões:** após a execução do estudo de caso, são analisados os dados obtidos e realizada breve comparação com alternativas sem a utilização de fibras. Essa análise tem por objetivo verificar a influência da incorporação de fibras com fins de colaborar para o acréscimo da capacidade resistente do concreto e demonstrar as vantagens da sua aplicação. Por fim, são feitas as devidas conclusões sobre todo o processo elaborado neste trabalho.

#### 1.4 Apresentação do Trabalho

O presente trabalho está organizado de forma a se obter um fluxo de informações contínuo e coerente, sendo dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução, justificativas, objetivos traçados para o trabalho, suas delimitações e é apresentada a metodologia utilizada para o tema abordado.

No segundo capítulo, tem-se o aprofundamento sobre o tema Concreto Reforçado com Fibras (CRF), realizando a caracterização desse compósito e suas principais propriedades. Nesse capítulo, é dada a devida distinção para os conceitos importantes sobre o material, a

exemplo de suas propriedades mecânicas, do comportamento do material frente às solicitações de tração, compressão e flexão, bem como as especificações normativas para esse compósito.

No terceiro capítulo, a abordagem remete para o sistema construtivo de parede de concreto, com especial aplicação ao uso conjunto com fibras. Assim, as características intrínsecas ao sistema de paredes de concreto são reportadas, a fim de justificar suas vantagens em relação aos outros métodos construtivos.

A revisão bibliográfica de normas de projetos utilizadas, relacionadas ao dimensionamento de parede de concreto e utilização de CRF é apresentada no capítulo 4. O conhecimento de como as fibras atuam na capacidade resistente do elemento estrutural e as alternativas de sua aplicação voltada ao sistema construtivo de paredes de concreto é essencial para o estudo de caso. Nesse capítulo, portanto, são descritos os seguintes procedimentos normativos: o Modelo Código da *fib* (2012), o qual serviu de base a norma nacional ABNT NBR 16935:2021; a ABNT NBR 16935:2021, que trata, por sua vez, dos procedimentos de dimensionamento do CRF; e a ABNT NBR 16055:2012, que trata especificamente do sistema construtivo de parede de concreto. Esse capítulo contempla detalhes sobre os procedimentos de dimensionamento para o CRF, sendo indispensável para nortear o estudo de caso realizado na sequência.

No capítulo 5, além da apresentação do projeto arquitetônico, é realizado o estudo de caso, com base nas normas anteriormente apresentadas. Para tanto, é verificado o dimensionamento das lajes de CRF, dirigido para uma análise dos resultados e proposição de discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da investigação, além das sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do trabalho.

## 2. Concreto Reforçado com Fibras

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é um compósito formado pela incorporação de fibras na matriz cimentícia do concreto simples, a fim de melhorar o desempenho do material. Quando comparado ao concreto simples, o CRF apresenta propriedades mecânicas aprimoradas, sendo um material que favorece o controle da fissuração e contribui para o aumento da capacidade de deformação pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011, p. 142).

Sabe-se que o CRF vem sendo crescentemente utilizado em diversas situações na construção civil. Na Europa, por exemplo, o CRF já vem sendo empregado como elemento estrutural em lajes suspensas, para as quais as fibras são adotadas como o único sistema de reforço, enquanto no Brasil ainda é aplicado em elementos com baixo nível de demanda estrutural. Segundo Figueiredo (2014, p. 17), observa-se a crescente potencialização do uso do CRF e a aplicação deste material em elementos estruturais, independentemente do tipo de fibras.

O CRF pode ser produzido com diferentes tipos de fibras, sendo as mais usadas as fibras de aço e as fibras de polipropileno, ilustradas na Figura 1. Devido ao baixo coeficiente de dilatação térmica e elevado módulo de rigidez, a fibra de vidro AR (álcali resistente) apresenta elevada resistência a todos os tipos de ataques químicos, não sendo afetada, por exemplo, pela corrosão, como acontece com o aço. Esse fator, está correlacionado ao incremento de durabilidade das estruturas. Desta forma esta fibra também vem sendo utilizada com frequência para a produção do CRF.

Figura 1 – Ilustração dos tipos de fibras



(fonte: elaborada pelo autor)

A adição de fibras, de forma aleatória, ao concreto convencional causa modificações no seu comportamento, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, atuando desde as primeiras idades do concreto. Segundo Carnio (2017, p. 87), no estado fresco, por exemplo, as fibras atuam modificando a consistência do material, dificultando a liberação do ar gerado no processo de mistura, de modo que o ar aprisionado atua de forma negativa no concreto, podendo reduzir sua resistência. Ainda no processo de cura, as fibras causam um efeito de confinamento da pasta, reduzindo o surgimento de microfissuras provenientes da retração do concreto. Já no estado endurecido, a principal modificação que se observa está relacionada ao comportamento de pós-fissuração, onde o concreto passa a apresentar maior capacidade de deformação.

Pensando na aplicação do CRF em elementos estruturais, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos e modelos que estudem e tragam embasamento sobre o comportamento desse material. Para tal, pesquisas experimentais vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, por meio de ensaios laboratoriais que testam a resistência à compressão, tração, flexão e cisalhamento do CRF. Essas pesquisas têm por finalidade caracterizar o comportamento do material, de forma que possibilitem a formulação de modelos que tragam uma estimativa da resposta mecânica, utilizando diferentes estratégias e teorias.

Diversas são as vantagens apresentadas pelos elementos de CRF, tais como: aumento da durabilidade do material, menor custo de produção e manutenção e diminuição do tempo de

execução. Uma vez que as fibras atuam em melhorias nas propriedades mecânicas e no desempenho estrutural do concreto, as características fornecidas pela sua adição devem ser levadas em consideração nos métodos de dimensionamento.

Quando comparadas com o uso de armaduras longitudinais convencionais, a utilização de fibras no concreto se mostra ainda mais interessante para a aplicação em elementos contínuos, devido a sua distribuição aleatória na matriz, reforçando toda a peça, maior interface de aderência, ancoragem favorável e direção preferencial para as tensões principais. Em alguns tipos de elementos estruturais, as barras podem ser totalmente substituídas pelo uso de fibras, como no revestimento de túneis, a depender da natureza e magnitude dos esforços solicitantes, por exemplo. No entanto, em situações em que a peça tem tensões de tração localizadas existe a necessidade de reforço específico para a seção, sendo necessário o uso de barras convencionais mescladas com o uso da fibra ou utilizando apenas o reforço em barras. Ainda assim, mesmo que as fibras não sejam aplicadas em substituição total das armaduras em elementos lineares, elas atuam em conjunto com as barras para resistir aos esforços, principalmente após a fissuração da matriz, e podem reduzir a taxa de aço necessária na estrutura.

## **2.1 Interação Fibra-Matriz**

Sabe-se que o CRF tem grande atuação na redução do surgimento e propagação de fissuras dentro do material, devido ao efeito de ramificação das fissuras em substituição aos planos de ruptura discreta, sendo esse um dos principais ganhos da adição de fibras ao concreto. O surgimento de fissuras ao longo da seção transversal do concreto causa o dano do material, uma vez que tal comportamento é associado a todos os tipos de carregamentos aos quais o material é submetido. Quando surge uma fissura no concreto, a propagação da tensão no interior da matriz cimentícia é interrompida, sendo desviada para a seção não fissurada do material. A partir desse desvio, o material fica susceptível à ruptura, caso ocorra uma concentração de tensão na extremidade da fissura e essa tensão supere a tensão máxima resistida pela matriz.

Trabalhando com uma relação de comprimento da fibra e diâmetro do agregado adequada, para qualquer dosagem da mistura, as fibras ficam dispersas aleatoriamente na matriz, conforme ilustrado na Figura 2:

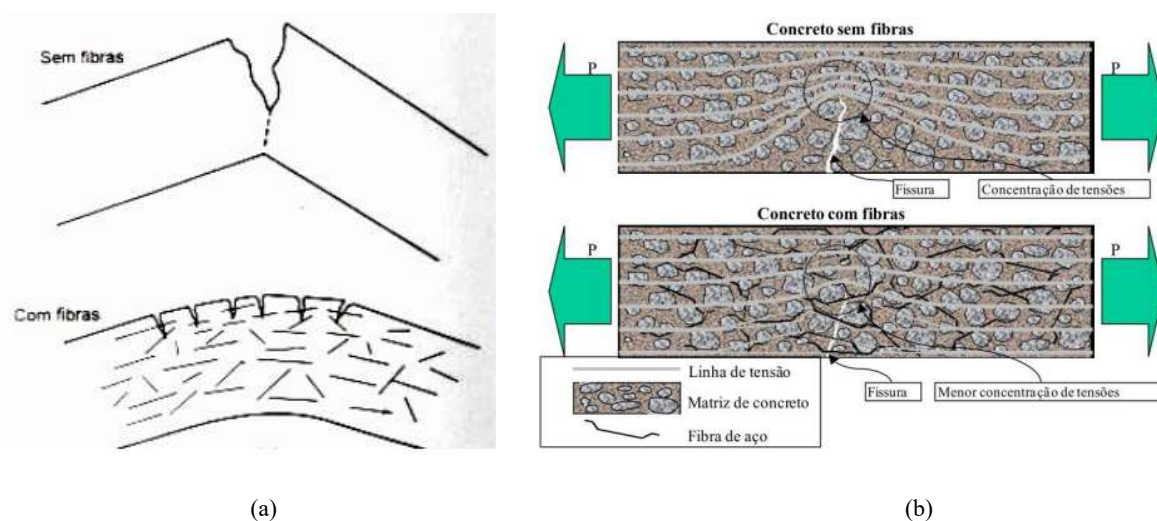
Figura 2 – Fibras dispersas aleatoriamente na matriz de concreto



(fonte: Neomatrix)

Com as fibras dispersas, conforme o surgimento das fissuras vai ocorrendo ao longo do elemento, elas atuarão no cruzamento da abertura da fissura. Assim, as tensões conseguem ser transferidas pelas fibras e o acúmulo de tensões é redistribuído, caracterizando uma diminuição da característica frágil do concreto simples. As Figuras 3 (a) e 3 (b) comparam os comportamentos do concreto simples e do concreto reforçado com fibras. Na Figura 3 (a) observa-se que a presença de fibras modifica o modo de ruptura do elemento, passando de uma única fissura para múltipla fissuração. Na Figura 3 (b), as linhas representam a trajetória de tensões no elemento, onde é possível verificar a atuação das fibras na propagação das tensões atuantes no concreto, diminuindo, assim, as chances de ruptura do material.

Figura 3 – Representação da múltipla fissuração do CRF (FONTE: MEHTA & MONTEIRO, 1994) (a) e Representação da distribuição de tensões do CRF (b)



(fonte: Mehta & Monteiro, 1994)

É necessário conhecer a forma de atuação das fibras no concreto e as mudanças causadas na sua estrutura para, então, considerar tais mudanças nos métodos de dimensionamento empregados. A interação entre a fibra e a matriz é fundamental para definir o comportamento do compósito, sendo necessário entender essa interação para parametrizar a contribuição das fibras e para prever o comportamento do compósito.

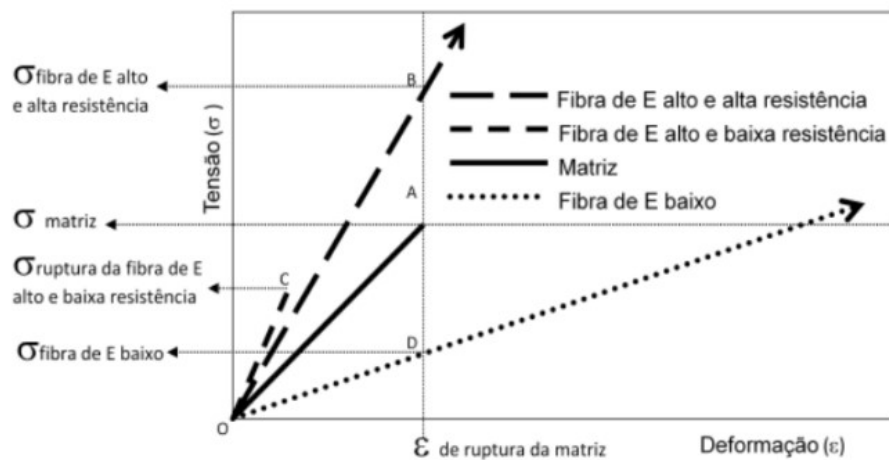
A interação fibra-matriz, que ocorre e interfere no comportamento do concreto reforçado com fibras, depende de vários fatores, tais como: geometria da fibra, volume das fibras empregada ao concreto, ancoragem com a matriz, módulo de elasticidade da fibra e resistência do aço (quando empregado), resistência do concreto, orientação das fibras, composição das matérias-primas do concreto, dentre outros. Desses, o volume de fibras é um dos principais parâmetros para a utilização das fibras como reforço ao concreto. Segundo pesquisas, a capacidade resistente pós-fissuração aumenta conforme o teor de fibras utilizadas na mistura cresce. Isso ocorre, pois, o aumento da quantidade de fibras possibilita um maior número destas atuando como ponte de transferência de tensões. Por outro lado, o aumento de fibras na matriz atua na diminuição da trabalhabilidade da mistura, sendo necessária a dosagem correta para o fim desejado (CARNIO, 2017, p. 87).

De acordo com Figueiredo (2005, p. 3), o desempenho na capacidade de reforço que a fibra proporciona ao concreto depende, principalmente, do módulo de elasticidade e resistência

Viabilidade do Emprego de Concreto Reforçado com Fibras em Elementos de Laje – Estudo de Caso

mecânica da fibra. A Figura 4 exemplifica a comparação de uma matriz, sem reforço, e reforçada com três tipos de fibras: uma de baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo, sendo uma de baixa e outra de alta resistência mecânica. No momento em que o compósito é submetido a tensões de tração, a deformabilidade dos diferentes materiais ocorre de maneira distinta, conforme pode ser visto abaixo:

Figura 4 – Comparação do comportamento da matriz e da matriz reforçada com três tipos de fibras com características distintas



(fonte: Figueiredo, 2005)

Pode-se verificar, analisando a Figura 4, que, para a fibra de baixo módulo de elasticidade, quando a matriz atinge sua tensão de ruptura ocorre uma tensão menor para o mesmo nível de deformação. Devido a isso, pode ocorrer ruptura da fibra, fazendo com que ela não colabore na resistência do compósito. Verificando o caso em que atingem altas tensões, percebe-se que é possível apresentar uma elevada deformação, ocasionando a abertura da fissura e gerando, novamente, baixa capacidade de reforço. De acordo com Figueiredo (2005, p. 4), uma forma de minimizar tais situações, é a utilização de elevados teores de fibras, porém há consequências em relação aos custos e trabalhabilidade. Considerando as fibras com altos módulos de elasticidades e baixa resistência é possível verificar que elas, também, apresentam capacidade de reforço reduzidas, pois não apresentam capacidade de deformação, resultando em um comportamento frágil. Baseado nisso, entende-se que as fibras de elevado módulo e

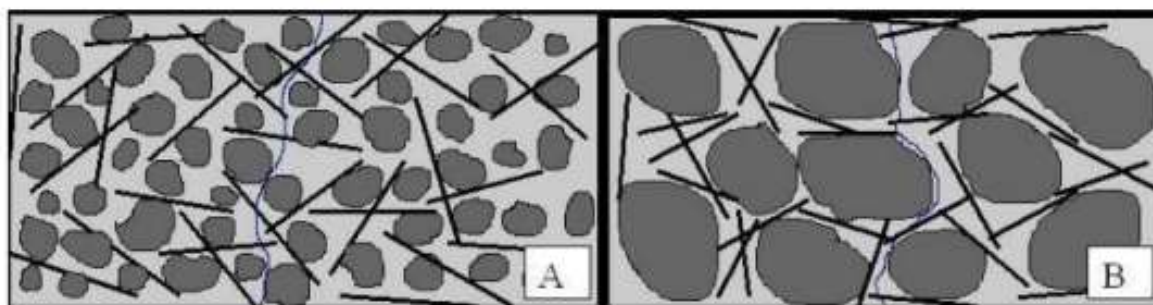


elevada resistência apresentam a melhor utilização, uma vez que, mesmo utilizadas em baixos volumes, o material apresentará resistências residuais após a fissuração.

Outra característica importante no desempenho do CRF é a sua geometria ou, mais especificamente, o seu fator de forma, ilustrado por  $\lambda_f$ . Tal parâmetro é obtido pela razão  $\lambda_f = \frac{l_f}{d_f}$  onde  $l_f$  é o comprimento das fibras e  $d_f$  o diâmetro das delas. De acordo com essa relação, conforme se aumenta o comprimento da fibra ou se reduz o seu diâmetro, tem-se um aumento no fator de forma, ocasionando aumento na resistência pós pico do CRF. Ainda, em geral, quanto maior  $\lambda_f$ , maior será a capacidade resistente pós-fissuração (JACOMINI 2021, apud LEE 2017).

Quanto ao comprimento das fibras, recomenda-se que a fibra possua duas vezes ou mais a dimensão máxima do agregado utilizado na matriz (FIGUEIREDO, 2005, p. 8). A compatibilidade de dimensões faz com que as fibras atuem como ponte de transferência de tensão, conforme ilustrado na Figura 5 abaixo:

Figura 5 – Representação do CRF com compatibilidade de dimensões (A) e sem compatibilidade de dimensões (B)



(fonte: Figueiredo, 2005)

Compreendendo o mecanismo de interação fibra-matriz é possível entender como é feita a transferência das tensões da matriz para as fibras e como elas auxiliam nas propriedades mecânicas do concreto. A utilização de fibras que têm um módulo de elasticidade maior que do concreto faz com que, após fissurada a matriz, a fibra atue a fim de evitar a propagação das fissuras, quando submetidas a solicitações de tração e de cisalhamento. Essa transferência das

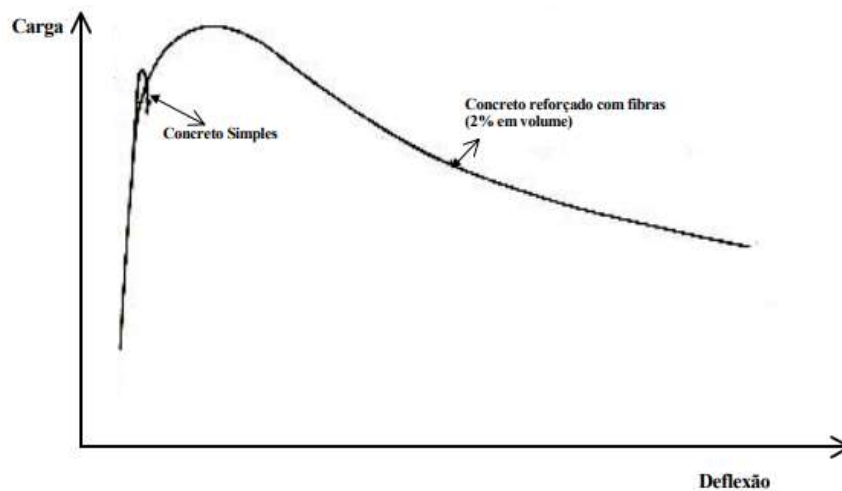
tensões da matriz para as fibras é a responsável pelo ganho de resistência à tração, à flexão, ao impacto e tenacidade observado no CRF.

## 2.2 Comportamento mecânico do CRF

Em 2017, Lee realizou estudos quanto à resistência à tração na flexão e a influência que diferentes volumes de fibras ocasionam na resistência do material. Nessa análise, ele realizou avaliações com três diferentes resistências de concreto, sendo 25, 35 e 45 MPa, e três volumes de fibras, sendo 0,25, 0,375 e 0,50% em relação ao volume da matriz. O que foi observado é que o valor de resistência à tração na flexão do CRF, ou limite de proporcionalidade, cresce juntamente com o volume de fibras, podendo ocorrer um aumento no valor do pico de fissuração, retardando o processo de formação de fissuras. Em outras palavras, quanto maior o volume de fibras, maior a tensão residual, onde a resistência à tração está relacionada à resistência à compressão da matriz.

A Figura 6 abaixo representa o comportamento carga X deflexão para um concreto convencional e um concreto reforçado com fibras (CRF), onde fica evidente o ganho de resistência obtido pelo uso de fibras:

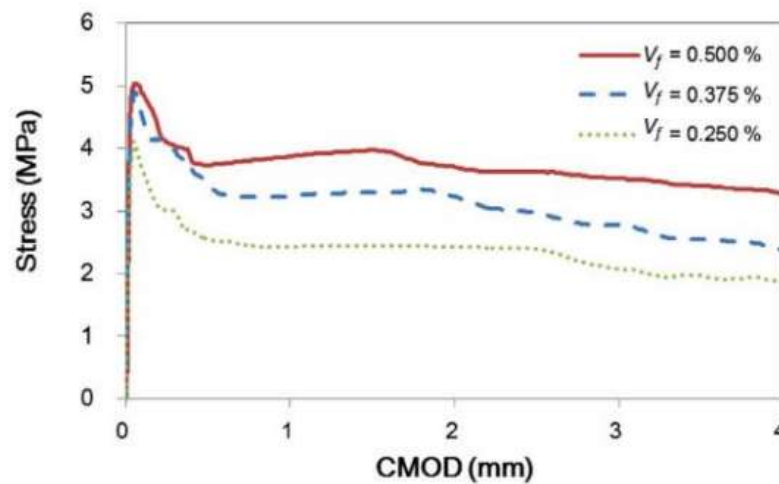
Figura 6 – Comportamento carga x deflexão de um concreto convencional e do CRF



(fonte: Mehta & Monteiro, 1994)

A Figura 7 demonstra o comportamento carga x deflexão para um CRF com a mesma resistência, mas com três diferentes consumos de fibra. Analisando, percebe-se que o aumento dos teores de fibras não ocasiona alterações significativas no trecho ascendente da curva de ensaio de tração na flexão. No entanto, para o comportamento pós-pico de tensão fica evidente que quanto maior o teor de fibras, maior será a resistência residual advinda das fibras, mostrando que a mesma depende diretamente da quantidade de fibras utilizadas.

Figura 7 – Comportamento tensão x abertura de fissura para um CRF de mesma resistência e teores diferentes de fibra

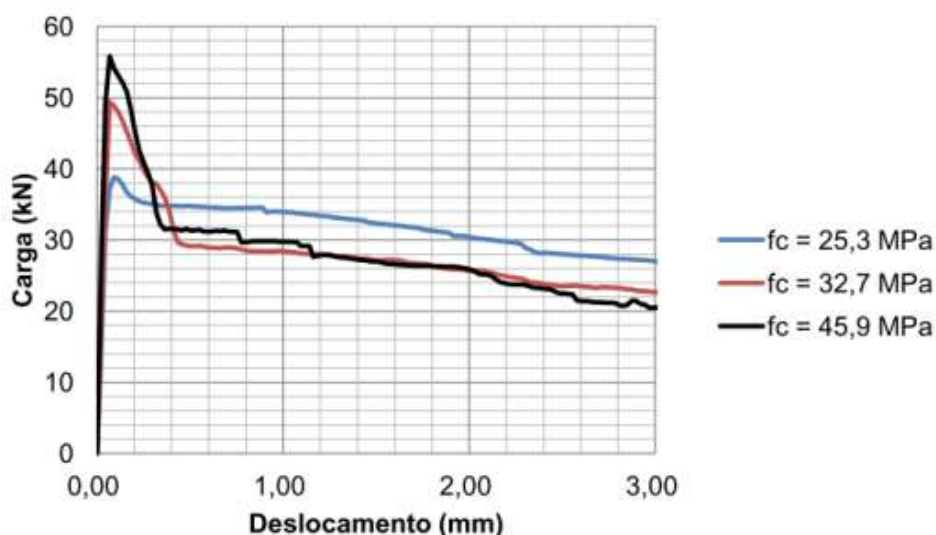


(fonte: Lee, 2017)

Analisando os estudos de Lee (2017), fica evidente que quanto mais alto o teor de fibras, menor é a probabilidade de ruptura frágil. Quando ocorre a fissuração da matriz, parte da tensão que está sendo resistida pela matriz é transmitida para as fibras, que passam a atuar no processo de controle da abertura e propagação de fissuras. Assim, realizando uma análise da quantidade de carga atuando em cada fibra, em um mesmo nível de tensão, quanto mais fibras presentes no compósito, menor é a tensão resistida por cada uma. Ainda, segundo Figueiredo (2005, p. 4), quanto maior a resistência à tração das fibras, maior é a capacidade resistente pós-fissuração, apresentando maior resistência residual.

Quando é mantido o volume de fibras empregadas na mistura, mas é alterada a resistência da matriz, tem-se uma diminuição do desempenho das fibras. Nesse caso, para um mesmo deslocamento, à medida que a resistência do concreto aumenta, a carga resistida na pós-fissuração diminui. Isso significa que, para um mesmo teor de fibras, conforme a resistência da matriz aumenta, o valor da tensão transferida para as fibras na pós-fissuração também aumenta, ocasionando uma maior propensão de ruptura, e conseqüentemente, uma capacidade resistente menor (JACOMINI, 2021, apud FIGUEIREDO, 2005 & FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000). Esse comportamento é ilustrado na Figura 8 abaixo:

Figura 8 – Comportamentos carga x deflexão para CRF com mesmo volume de fibra e resistência da matriz diferente

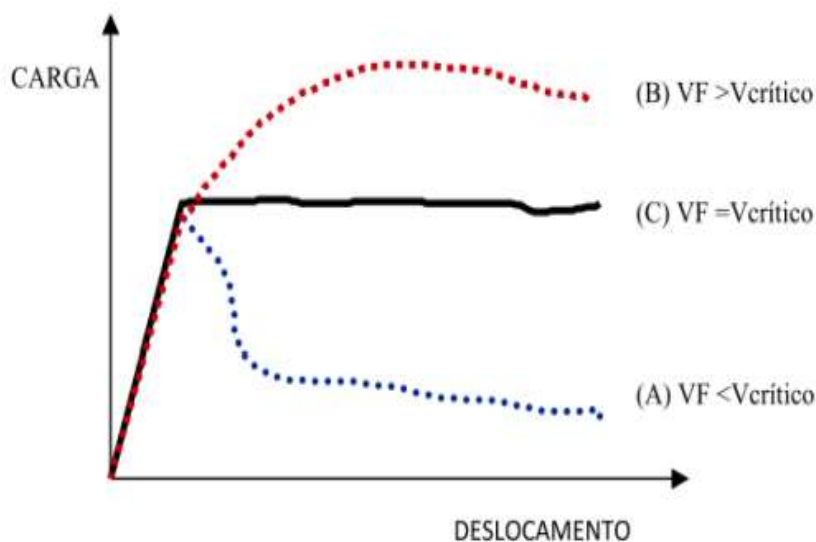


(fonte: Figueiredo, Nunes e Tanesi, 2000)

O conceito de volume crítico surge quando é considerada a influência que o teor de fibras exerce na interação fibra matriz. O volume crítico corresponde a quantidade de fibras que não altera a capacidade resistente da matriz ou, em outras palavras, o CRF apresenta um comportamento similar ao elastoplástico perfeito. Isso significa que com o teor de fibras abaixo do volume crítico, o CRF desenvolve comportamento de amolecimento (*softening*) e, ao contrário, tendo um teor de fibras maior que o volume crítico, desenvolve um comportamento de endurecimento (*hardening*). A Figura 9 abaixo, retirada da pesquisa de Figueiredo (2000)

demonstra o comportamento do CRF para os volumes de fibra crítico, acima e abaixo desse, quando submetido a um ensaio de tração na flexão:

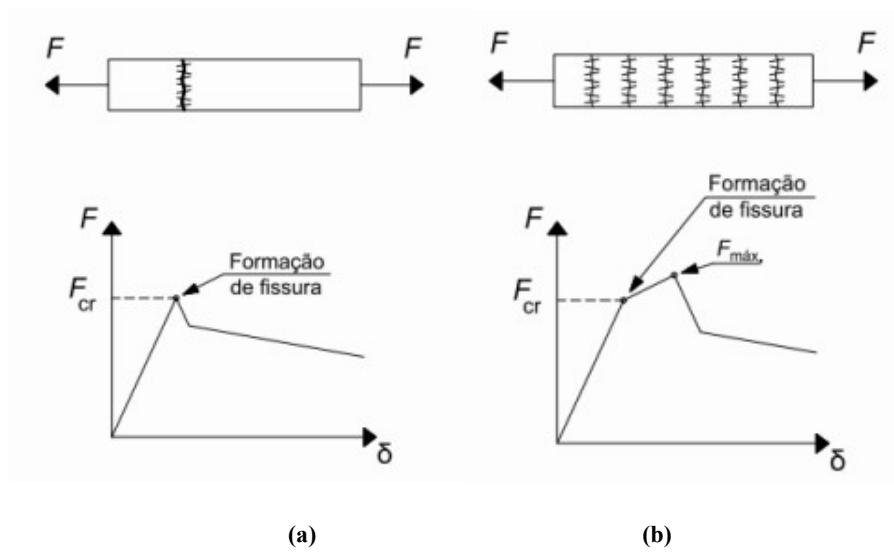
Figura 9 – Comportamento do CRF quando submetido a um ensaio de tração na flexão para os volumes de fibra crítico, abaixo e acima desse



(fonte: Figueiredo, 2000)

Também demonstrado na ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), os comportamentos *softening* e *hardening* do CRF em tensão axial estão demonstrados nas Figuras 10 (a) e 10 (b) abaixo. O primeiro, demonstrado na Figura 10 (a), é caracterizado como um comportamento de amolecimento pós-fissuração e é dado com a diminuição da resistência após o aparecimento da primeira fissura, ou seja, a resistência pós fissuração do material é inferior à resistência da matriz, apresentando uma evolução da abertura da fissura existente. Já o comportamento *hardening*, ilustrado na Figura 10 (b), também considerado como de endurecimento, apresenta uma resistência residual superior à da matriz, ocasionado um processo de múltipla fissuração no material.

Figura 10 – Comportamento Softening do CRF em tensão axial (a) e Comportamento Hardening do CRF em tensão axial



(fonte: ABNT NBR 16935, 2021)

### **3. Sistema Estrutural Parede/Laje em Concreto Reforçado com Fibras**

O sistema estrutural utilizado interfere diretamente nas formas de interação entre os elementos estruturais do sistema sendo, assim, indispensável conhecê-lo para identificar as particularidades na avaliação do estudo de caso. Podem ser utilizados diversos tipos de sistemas construtivos, mas o que será aplicado nesse estudo é o sistema de paredes e lajes de concreto moldadas, em conjunto, no local.

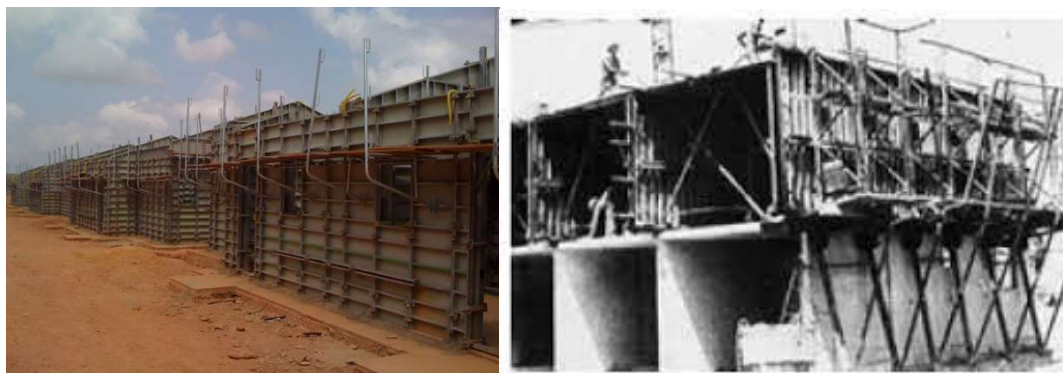
Parede de concreto é um sistema estrutural composto por paredes autoportantes e lajes. As paredes são de concreto, moldadas no local, com formas removíveis e as lajes são, em geral, maciças de concreto armado. Esse é um sistema que apresenta alta produtividade do processo, principalmente quando empregado em projetos que possuem grande extensão e/ou grande número de edificações com desenho arquitetônico semelhante. A utilização desse método, com o uso de formas, torna esse sistema construtivo um dos métodos mais industriais possíveis, visto sua alta produtividade e repetitividade.

A Revista *Téchne* (2019), define o seguinte: “O sistema construtivo de paredes de concreto é um método de construção racionalizado que oferece produtividade, qualidade e economia de escala quando o desafio é a redução do déficit habitacional.” O sistema construtivo de paredes de concreto é voltado para construções, em sua maioria residenciais, cuja estrutura é voltada para a construção de casas térreas, sobrados e edifícios.

Acredita-se que a utilização de sistemas construtivos não convencionais surgiu no Brasil, na década de 80, quando as construtoras buscavam novas tecnologias a fim de racionalizar a produção, otimizar as atividades e minimizar os custos de execução. Dentre os sistemas construtivos desenvolvidos nesse período e atendendo a esses requisitos, destacou-se o sistema de paredes de concreto moldadas in loco. Em 1980 a empresa brasileira Gethal desenvolveu a tecnologia de Paredes e Lajes em Concreto Celular moldadas no local, produto que demonstrou ser melhor tecnicamente e de menor custo quando comparado ao concreto convencional e ao sistema tradicional até então utilizado (Figura 11 a). Na mesma época, houve a tentativa de implantação da tecnologia importada pela empresa francesa Outinord, que

utilizava um sistema de paredes de concreto moldadas no local, onde eram utilizadas formas metálicas tipo túnel que permitiam a concretagem simultânea de paredes e lajes, conforme a Figura 11 (b).

Figura 11 – Sistemas construtivos Gehtal (a) e Outinord (b)



(a)

(b)

(fonte: Gehtal (a) e Outinord (b))

Apesar dos seus estudos mais antigos, esse sistema construtivo teve sua solidificação confirmada no Brasil apenas em 2012, com a publicação da norma ABNT NBR 16055:2012 – Parede de concreto moldada no local para a construção de edificação – requisitos e procedimentos, que trouxe um avanço para os sistemas construtivos no país. Antes disso, para que esse sistema pudesse ser usado no Brasil, muito tempo foi investido em adequações de cálculos estruturais e normas técnicas de outros países onde o sistema já se encontrara desenvolvido e consolidado, para que assim, baseado em normas estrangeiras, as normas brasileiras pudessem ser adaptadas e consolidadas. Um exemplo era a utilização do Documento de Avaliação Técnica (DATec), um documento técnico que contém os resultados da avaliação técnica e condições de execução/operação, uso e manutenção de qualquer produto inovador. Assim, o alto investimento inicial necessário e as limitações associadas causaram uma descontinuidade da tecnologia de paredes de concreto no Brasil.



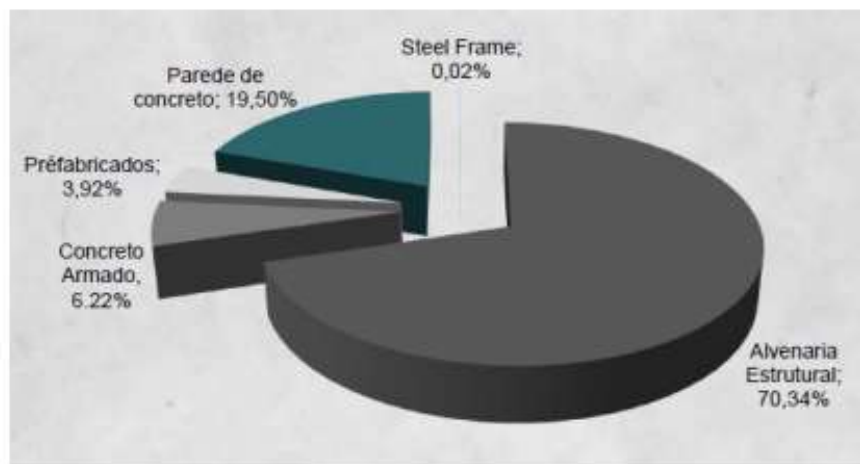
Mais tarde, em 2006, a empresa Rodobens Negócios Imobiliários trouxe de volta o sistema construtivo de paredes de concreto para o Brasil, locando os primeiros jogos de forma de plástico para a construção de um condomínio residencial. Em 2007, com o objetivo de criar um texto pré-normativo para nortear as obras que já utilizavam o sistema, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC) e o Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS) se juntaram para descrever procedimentos executivos e de cálculo para edifícios em parede de concreto de até 5 pavimentos.

Quando chegou ao Brasil, as paredes de concreto eram projetadas e construídas sem função principal estrutural, sendo usadas como paredes divisórias, por exemplo, pois ainda não existiam estudos suficientes e confiáveis referentes a seu uso como elemento estrutural. Com a publicação da ABTN NBR 16055, em 2012, e maior familiarização dos engenheiros estruturais, as paredes de concreto podem ser dimensionadas e executadas para exercer essa função.

Em 2009, a criação do programa Minha Casa Minha Vida, programa social com o objetivo de diminuir o déficit habitacional do país, foi um impulsionador para o crescimento do sistema construtivo de paredes de concreto, o que persiste até os dias atuais. Este fato se deve à alta demanda do programa, onde diversos apartamentos e casas são construídos anualmente, tornando a necessidade de construções mais rápidas e industrializadas cada vez maior, onde o sistema de paredes de concreto se torna um grande promissor.

A Figura 12 abaixo demonstra os resultados de uma pesquisa realizada em agosto de 2012, onde foram levantados os métodos construtivos utilizados no mercado da construção civil brasileira por 39 grandes construtoras. Da análise, percebe-se que o sistema de paredes de concreto corresponde à quase 20% dos sistemas, ficando atrás apenas do sistema construtivo de alvenaria estrutural, correspondendo a uma parcela significativa do mercado da construção civil.

Figura 12 – Percentual de utilização dos métodos construtivos, pesquisado em 39 diferentes construtoras no Brasil



(fonte: ABCP, 2012)

O sistema construtivo de paredes de concreto é conhecido por suas diversas vantagens, como: alta produtividade, diminuição de desperdícios, versatilidade, relação custo/benefício competitiva quando comparado a outros sistemas construtivos, maior controle de qualidade e sistema industrializado de construção. Para sua devida utilização e aproveitamento das suas características, esse sistema possui pré-requisitos essenciais para sua aplicação. Pode-se mencionar a necessidade de projetos arquitetônicos compatíveis com o sistema construtivo, onde a padronização das unidades, a utilização de simetrias e de medidas modulares facilitam o processo construtivo, desde a fabricação até a montagem da forma em obra.

De acordo com a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), todas as paredes de cada ciclo construtivo de uma edificação são moldadas em uma única etapa de concretagem. Isso permite que, após a deforma, as paredes já contenham, em seu interior, vãos para as portas e janelas, tubulações ou eletrodutos de pequeno porte, elemento de fixação para coberturas e outros elementos específicos quando for necessário. Assim, não se compromete a estrutura do sistema construtivo, além de viabilizar manutenções ou alterações nas instalações elétrica e hidrossanitários ao longo da vida útil.

Quanto às instalações, a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), que considera a armadura de aço como o principal reforço da parede de concreto, estabelece diretrizes a serem atendidas para que as instalações passem por dentro das paredes. Não é permitida a passagem de

tubulações nos encontros de paredes, assim como também não se admitem tubulações horizontais, a não ser em trechos de até um terço do comprimento da parede, não ultrapassando 1 m e sendo este trecho considerado não estrutural. É comum passar tubulações, como as hidrossanitárias, por fora da estrutura, dentro de shafts, com a vantagem de facilitar quaisquer manutenções futuras necessárias.

É interessante que os projetos em que serão aplicadas estruturas de CRF contemplem empreendimentos de grande porte e que possam ter um alto índice de repetição de edificações, a fim de aproveitar ao máximo a alta capacidade de produtividade desse sistema. Outros aspectos importantes são a escolha do concreto, tipo de reforço a ser utilizado no concreto e tipo de forma para o moldar o concreto, para garantir a qualidade esperada, no tempo previsto.

### **3.1 Projetos**

Acredita-se que se pode aplicar o sistema construtivo de paredes de concreto para praticamente qualquer projeto arquitetônico (Morais 2018, p. 14, apud ABCP 2010). No entanto, para se obter o máximo desempenho desse sistema, pensando em fabricação de grande escala, é fundamental observar as condições intrínsecas de cada sistema, buscando um menor prazo de execução, menor custo, minimização de imprevistos e maior qualidade do produto final.

O sistema de parede de concreto tem como premissa principal a velocidade de execução. Pensando nisso, algumas decisões de projeto precisam ser levadas em consideração para atender a esse pré-requisito. Assim, são priorizados projetos que contenham apenas paredes de vedação que sejam estruturais, não contendo paredes divisórias estruturais, pois isso poderia atrapalhar significativamente a velocidade de execução da obra, ao criar-se mais uma etapa construtiva no processo.

Além disso, são priorizados os projetos que apresentam simetria na geometria da edificação em planta, modulação de medidas, a fim de facilitar a montagem das formas no canteiro de obras, alinhamento entre as paredes de diferentes pavimentos e padronização das alturas entre pisos (para construções com mais de um pavimento), a fim de aumentar a produtividade de execução.

Quando se trata especificamente do projeto de estruturas de concreto reforçado com fibra, todas as premissas citadas anteriormente podem ser aplicadas. Leva-se, ainda, em consideração o ganho de produtividade obtido devido ao incremento nas propriedades mecânicas obtido pelas fibras, fazendo com que as armaduras possam ser diminuídas e o processo de montagem seja mais rápido.

### 3.2 Fôrmas

Segundo definição da ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), o sistema de fôrmas é composto de estruturas provisórias, cujo objetivo é moldar o concreto fresco. Esse sistema é formado por outros elementos, como painéis de fôrmas, escoramento, andaimes, entre outros. Ainda seguindo a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), as recomendações são de que o sistema de fôrmas deve ser projetado e construído de modo a resistir às diversas solicitações durante o processo executivo, obter uma rigidez suficiente para garantir as especificações de projeto e a integridade dos elementos estruturais e garantir estanqueidade e conformidade com a geometria das peças que estão sendo moldadas.

Ainda segundo a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), as fôrmas podem ser de três materiais: metal, madeira e plástico, sendo que algumas características importantes na escolha do conjunto de formas são o peso por m<sup>2</sup> e a facilidade de montagem. A ABCP (2007), definiu e caracterizou esses tipos de forma, como sendo:

- Fôrmas Metálicas: ilustradas na Figura 13, são quadros e chapas em alumínio ou aço que estruturam o painel da forma e dão acabamento à peça concretada. Esse tipo de forma possui grande durabilidade, podendo ser feito em aço, o que a torna mais pesada, ou em alumínio, caso em que ela é mais leve. Além disso, costumam ter um alto custo empregado a sua aquisição.
- Fôrmas Plásticas: ilustradas na Figura 14, são quadros e chapas feitos com plástico reciclável, tanto para a estruturação de seus painéis como para dar acabamento à peça concretada. Necessitam de contraventamento por estruturas metálicas. São tão leves quanto as formas de alumínio, mas possuem baixa durabilidade.

- Fôrmas Metálicas com Compensados ou de Madeira: ilustradas na Figura 15, são compostas por quadros em aço ou alumínio e utilizam chapas de compensado de madeira para dar o acabamento na peça concretada. Costumam ser mais pesadas que as formas de alumínio e mais leves que as formas de aço, sendo a durabilidade menor em comparação a ambas.

Figura 13 – Fôrma Metálica



(fonte: Neoforma)

Figura 14 – Fôrmas Plásticas



(fonte: Tecwall)

Figura 15 – Fôrmas de Madeira

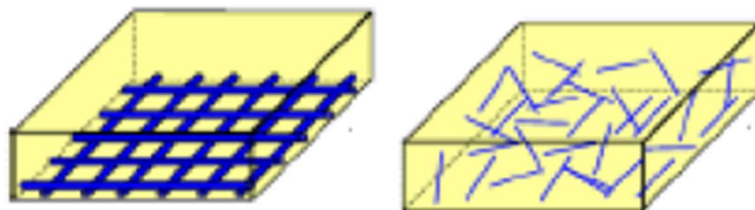


(fonte: Neoforma)

### 3.3 Concreto

Conforme já detalhado no Capítulo 2, o concreto convencional apresenta um comportamento frágil, com baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido a esforços de tração. As adições de armadura e fibras visam melhorar estas questões. Ao contrário da tela de aço, que atua de forma bidirecional, a distribuição das fibras na peça concretada é multidirecional, pois ocorre de forma aleatória, conforme ilustrado na Figura 16. Assim, o CRF lida melhor com os esforços aos quais a estrutura é submetida, que também são multidirecionais.

Figura 16 – Comparativo do Reforço com Tela de Aço X Reforço com Fibra



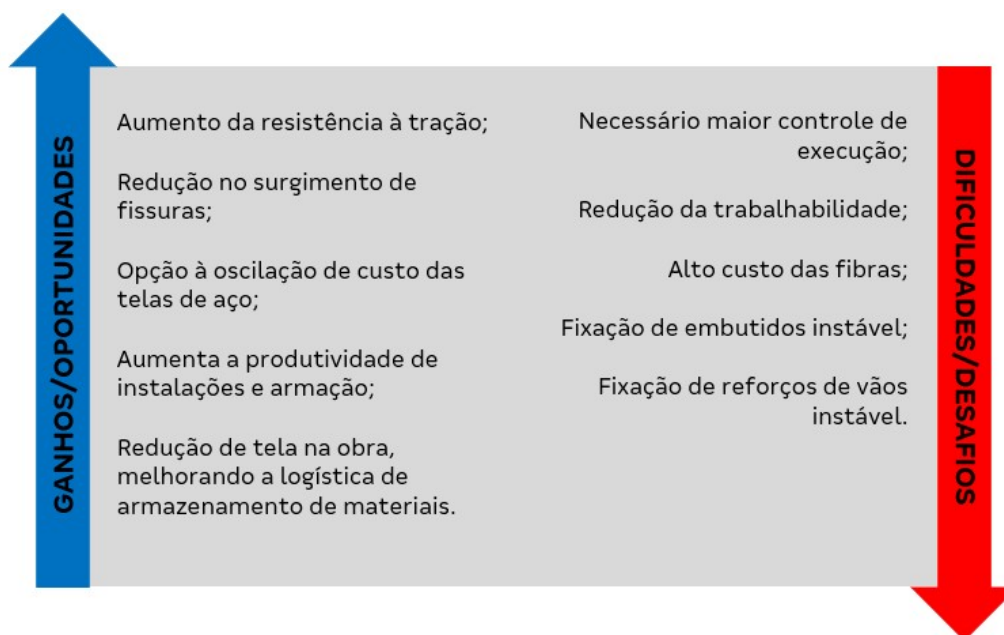
(fonte: Birck, 2021)

O CRF se destaca pelo fato de melhorar diversas características do concreto convencional, como o controle de fissuração e aumento da capacidade de deformação, conforme apontado no Capítulo 2. Para o uso de CRF é indispensável a determinação do módulo de elasticidade do concreto, principalmente porque, em geral, as lajes são maciças e concretadas em conjunto com as paredes. Com base no módulo obtido é possível definir a quantidade mínima de dias necessários para que as lajes fiquem escoradas.

Quanto à trabalhabilidade, o CRF pode ser dosado para qualquer nível de fluidez, mas é aconselhado a utilização do concreto autoadensável, devido a sua grande plasticidade e capacidade de se moldar, o que evita a necessidade de vibração do concreto. Além disso, a elevada viscosidade do concreto autoadensável evita a segregação dos materiais.

A Figura 17 abaixo ilustra, de forma geral, uma breve comparação entre a utilização do concreto armado e do CRF, para paredes de concreto. São levados em consideração os ganhos e os riscos quando é utilizada nova tecnologia do CRF na substituição do concreto armado.

Figura 17 – Ganhos e riscos da substituição do concreto armado pelo CRF



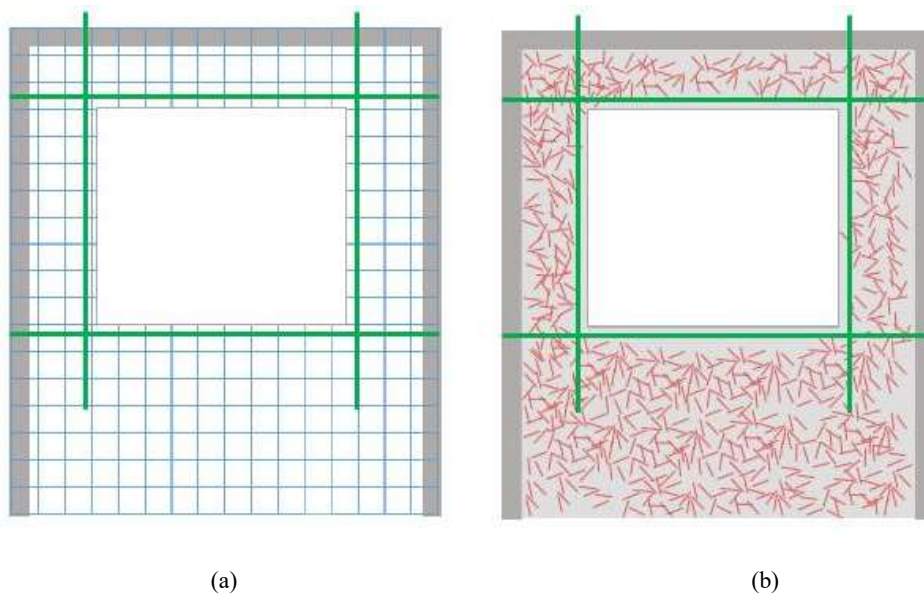
(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.4 Armadura

A garantia da alta produtividade do sistema de paredes de concreto se consegue com velocidade de execução, o que faz com o uso de fibras torne-se um fator significativo na aplicação desse sistema. Enquanto no concreto armado é necessário trabalhar com um sistema composto por armaduras principais e telas soldadas, no uso de CRF, as armaduras são dispensadas ou minimizadas, reduzindo ou, até mesmo, as excluindo. Assim, uma das fases da execução, a montagem de armaduras, pode ser dispensada quando o CRF é utilizado. Armaduras de reforço ainda são mantidas, mas apenas em seções críticas, onde as solicitações internas são elevadas, como em pontos de vinculação entre os elementos estruturais ou pontos de aplicação de carga. A Figura 18 exemplifica isso, comparando a armadura de reforço em uma estrutura de concreto armado com uma estrutura de CRF, para o reforço no entorno de aberturas.



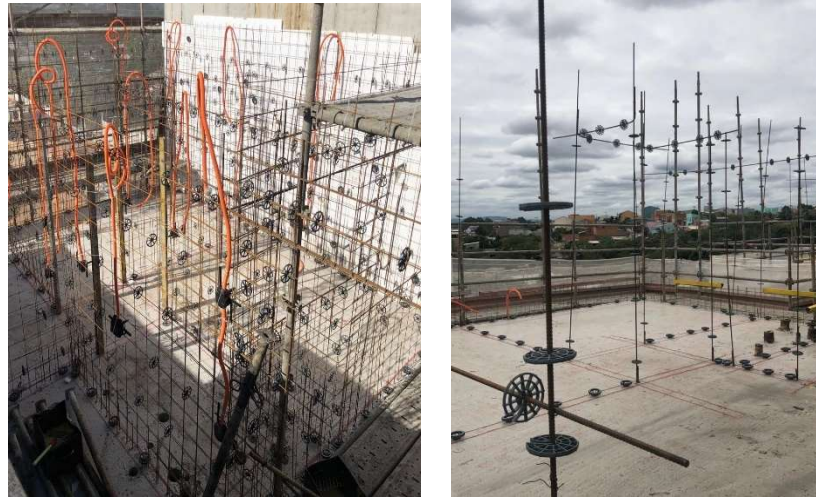
Figura 18 – Ilustração de reforço em estrutura de concreto armado (a) e CRF (b)



(fonte: Birck, 2021)

O sistema de parede de concreto armado torna-se mais demorado e passível de erros, uma vez que necessita de mão de obra qualificada para a execução da atividade, principalmente no que se refere ao posicionamento e à montagem das telas de aço. O processo de montagem, quando utilizado o CRF, apesar de não ser dispensável, torna-se muito mais prático e rápido, além de ser mais simples. Entretanto, a produção e aplicação do CRF, bem como o dimensionamento de estruturas produzidas com esse material, demandam conhecimento específico sobre o assunto, a fim de se alcançar um produto com adequado desempenho e de qualidade. As Figuras 19 (a) e 19 (b) trazem um exemplo real da montagem de armaduras nos sistemas de parede de concreto armado e CRF.

Figura 19 – Montagem de armaduras nos sistemas de parede de concreto armado (a) e CRF (b)



(a)

(b)

(fonte: Birck, 2021)

Ainda, de acordo com a ABNT NBR 16055:2021 (2012), além da função estrutural, a armadura também tem a função de suportar os elementos das instalações elétricas e hidráulicas. No modelo de reforço tradicional com tela de aço, as caixas elétricas são fixadas na tela de aço, porém, no reforço com fibra, não é possível seguir com o mesmo modelo de fixação. Sendo assim, devem ser desenvolvidos métodos alternativos de fixação, observando que algumas soluções de adaptação podem tornar o processo construtivo um pouco mais trabalhoso, sendo necessária mais atenção em alguns detalhes.

### 3.5 Execução

O processo de execução de uma estrutura em CRF envolve, resumidamente, as seguintes etapas:

- **Fundação:** execução do tipo de fundação especificada em projeto, com rigoroso nivelamento da base e contendo os arranques verticais das paredes e a localização das instalações elétricas e sanitárias definidas;

- **Armação:** quanto existente, a montagem das armaduras é a segunda etapa da execução. Nessa etapa, quando existentes em conjunto com as fibras, posicionam-se as telas e reforços previstos no detalhamento do projeto estrutural, dando especial atenção para a fixação dos espaçadores, responsáveis por garantir o cobrimento da armadura. Quando não são utilizadas telas soldadas, apenas são posicionadas as telas de reforço, se existirem, conforme projeto estrutural;
- **Instalações Elétricas e Hidráulicas:** nessa etapa, são posicionados e fixados os eletrodutos e condutores hidráulicos, se esses forem projetados para passar por dentro das paredes. Como o CRF contém pequena, ou nenhuma, taxa de armadura convencional, deve-se ter especial atenção nos elementos em que serão fixados os eletrodutos, para evitar que não sejam deslocados no momento da concretagem;
- **Formas e Concretagem:** nessa etapa, é realizada a montagem dos painéis de formas e, em seguida, inicia-se a concretagem. É necessário atentar-se aos ensaios tecnológicos solicitados em normas e projetos, que devem ser executados a partir dessa etapa. Deve-se ter cuidado na dosagem das fibras, que pode ocorrer no local de mistura do concreto ou no local de concretagem. Ainda, é necessário rigoroso controle no lançamento, para separar concreto de parede e laje, quando esses possuem especificações diferentes;
- **Desforma e cura:** De modo geral, no sistema de paredes de concreto o concreto deve respeitar a resistência à compressão mínima para desforma de acordo com o ciclo de concretagem, como por exemplo para uma desforma após 14 horas da concretagem é necessária superior ou igual a 3 MPa. Geralmente aos 28 dias, especifica-se resistência à compressão não menor que 25 MPa. Por fim, deve-se ter especial cuidado com a cura do concreto, a fim de diminuir o surgimento de fissuras superficiais.

#### **4. Dimensionamento de Estruturas em Concreto Reforçado com Fibras**

Internacionalmente, o CRF já é normatizado em diversos países, com normas que tratam sobre o dimensionamento e controle tecnológico do material. Já no Brasil, de acordo com Carnio (2017, p. 28), os estudos e elaborações de referências para sua normatização se iniciaram em 2011, com um Comitê de Estudos da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (Abece). Posteriormente, em 2016, foi realizada a publicação das práticas recomendadas pelo Comitê 303, parceria entre o Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon) e Abece, dando maiores informações técnicas sobre o tema. Tais práticas foram baseadas em normas internacionais vigentes e adaptadas para as condições brasileiras. A partir dos estudos elaborados por este comitê, ocorreu, em fevereiro de 2021, a publicação das novas referências normativas brasileiras sobre o concreto reforçado com fibras pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Ao redor do mundo, diversos fóruns, workshops e congressos sobre o assunto têm surgido, onde o tema, concreto com fibras para aplicação estrutural, tem sido bastante discutido, na busca de estratégias para a consolidação de procedimentos para dimensionamentos e utilização desse material. Com a publicação do Código Modelo da *fib* (2012), a utilização das fibras como reforço para elementos estruturais possui normatização vigente desde então e apresenta resultados otimistas para as aplicações.

Em dezembro de 2018, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou a comissão de estudo para o desenvolvimento da normativa, onde ocorreram reuniões sobre o tema e o escopo compreendia os parâmetros de projeto, especificação das fibras para concreto, preparação e o controle de concreto reforçado com fibras. No dia dezoito de fevereiro do ano de dois mil e vinte um, normas referentes ao concreto com fibras foram publicadas pela ABNT, fato esse que passa a dispensar a obtenção do Datec para utilização desta tecnologia construtiva, dado que agora a inovação proposta está contemplada em norma brasileira.

Dessa forma, atualmente, pode-se citar as seguintes normalizações que envolvem o uso do CRF em âmbito nacional:

- ABNT NBR 15305:2005 – Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro – Procedimentos para o controle de fabricação (2005);

- ABNT NBR 15530:2019 - Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio (2019);
- ABNT NBR 16935:2021 - Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento (2021);
- ABNT NBR 16940:2021 - Concreto reforçado com fibras — Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) — Método de ensaio (2021);
- ABNT NBR 16938:2021 - Concreto reforçado com fibras — Controle da qualidade (2021).

Destaca-se, entre elas, a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), que trata sobre projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras, e apresenta, entre outros aspectos, procedimentos para o dimensionamento de elementos lineares constituídos por este material.

#### **4.1 ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (2014)**

Atualizada em 2014, a ABNT NBR 6118:2014 define os critérios gerais que regem o projeto das estruturas de concreto, sejam elas de edifícios, pontes, obras hidráulicas, portos, túneis, aeroportos e etc. Assim, seja qual for a obra em questão, se estruturas de concreto estiverem envolvidas, é necessário observar os critérios levantados pela ABNT NBR 6118:2014.

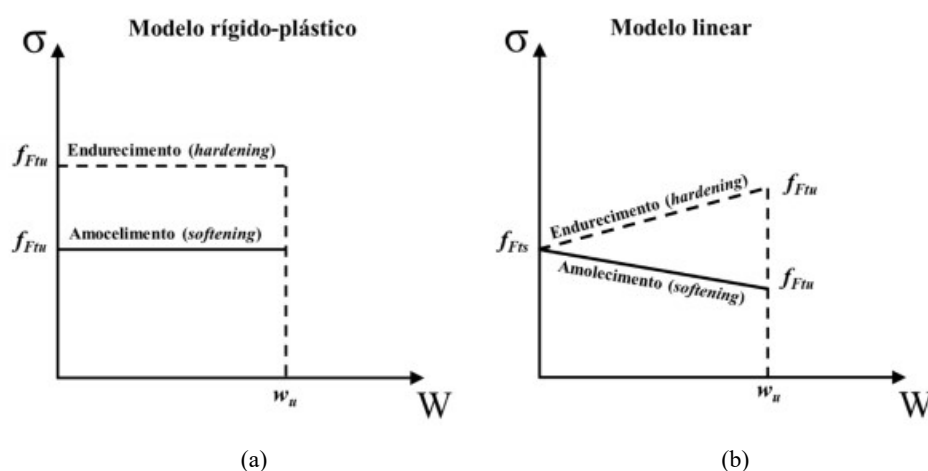
É importante levar em consideração que a ABNT NBR 6118:2014 tem aplicações limitadas quanto ao tipo de concreto utilizado. O documento especifica bem quais níveis de massa específica são considerados na aplicação das diretrizes, sendo elas: estruturas de concretos convencionais, identificados por massa específica seca; estruturas em que a massa deve ser de  $2.000 \text{ kg/m}^3$  até  $2.800 \text{ kg/m}^3$ ; estruturas que façam parte do grupo I de resistência (C10 a C50), conforme classificação da ABNT NBR 8953:2015. Além disso, concretos especiais como concreto-massa e concreto sem finos não valem para a norma. Assim, ela deve ser complementada por outras normas que estabeleçam critérios para estruturas específicas.

## 4.2 Código Modelo da *fib* (2012)

Como já comentado anteriormente, a primeira e maior dificuldade para a utilização do CRF em termos estruturais no Brasil é a falta de disseminação dos procedimentos de dimensionamento da norma brasileira publicada recentemente, além da sua tardia publicação. Tem-se, então, em âmbito internacional, desde o ano de 2012, Código Modelo da *fib*, que traz análises acerca do CRF e expõe práticas recomendadas para a utilização do compósito estruturalmente, independentemente do tipo de fibra que é utilizado.

O Código Modelo da *fib* (2012) teve sua concepção baseada em dois modelos de comportamentos apresentados, que levam em consideração a capacidade de reforço pós-fissuração, denominados como *hardening* e *softening*. Esses modelos são: o modelo rígido plástico e o modelo linear, ilustrados nas Figuras 20 (a) e 20 (b), respectivamente, sendo  $w_u$  o valor da abertura da fissura no ELU. Esses modelos são utilizados para encontrar as resistências última, ( $f_{Ftu}$ ), e residual de serviço, ( $f_{Fts}$ ), sendo a última definida como a resistência pós-fissuração de uma abertura de fissura significativa para o ELS. Ambos são calculados usando os valores de  $f_{R1}$  e  $f_{R3}$ , que serão apresentados adiante.

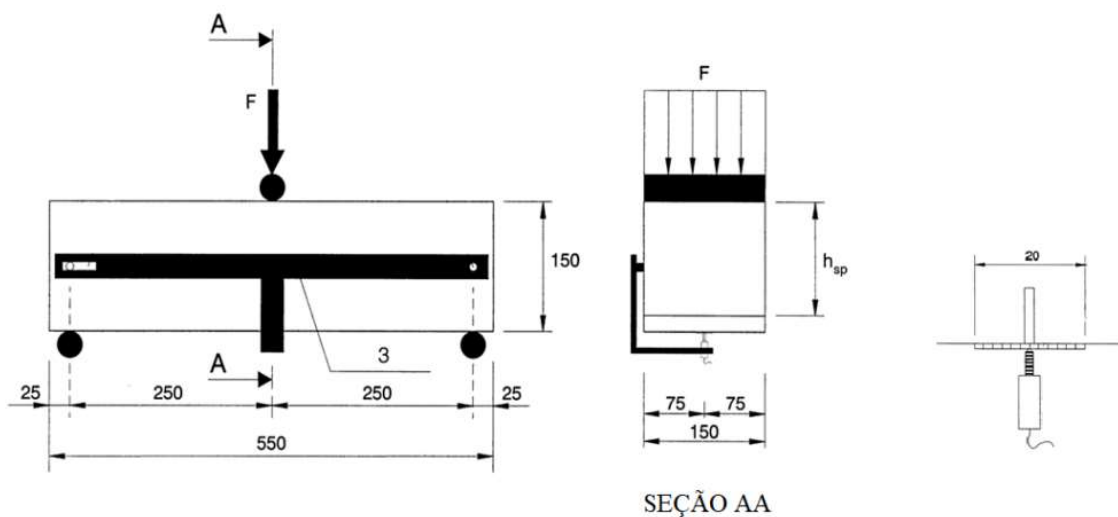
Figura 20 – Modelos de comportamento pós-fissuração: Rígido-plástico (a) e Linear (b)



(fonte: ABNT NBR 16935:2021)

Para caracterizar o comportamento do CRF, o Código Modelo da *fib* (2012) recorreu aos ensaios de flexão a 3 pontos, em prismas com entalhe inferior, conforme ilustrado na Figura 21. Baseado na norma europeia EN14651 (2007), esse ensaio apresenta grandes vantagens e, segundo Figueiredo (2014), possibilita a avaliação da resistência residual para diferentes níveis de fissuração.

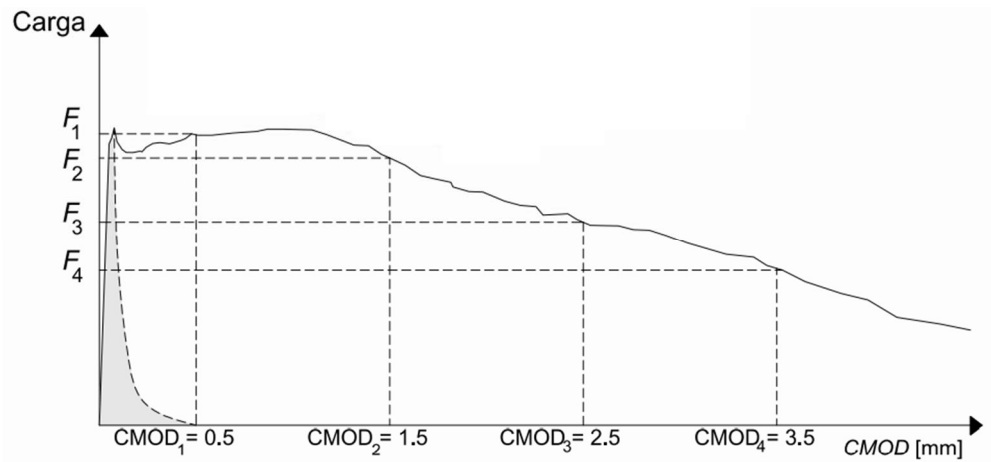
Figura 21 – Ensaio de flexão a 3 pontos em prismas com entalhe inferior



(fonte: ABNT NBR 16940:2021)

O ensaio de flexão a 3 pontos em prismas com entalhe inferior fornece uma curva de força por abertura de fissura, que, geralmente, é expressa pela medida linear da abertura do entalhe na face inferior do corpo de prova, ou *Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)*. Tal curva é ilustrada na Figura 22. Com base nela é possível obter a resistência residual para altos e baixos níveis de abertura de fissuras.

Figura 22 – Curva força X abertura de entalhe (CMOD)



(fonte: ABNT NBR 16935:2021)

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de flexão, as resistências de tração residual na flexão são definidas de acordo com a Equação 1 abaixo:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

$f_{R,j}$  = resistência residual à tração correspondente ao  $CMOD_j$  [MPa];

$F_j$  = carregamento correspondente ao  $CMOD_j$  [N];

$l$  = vão de ensaio do corpo de prova [mm];

$b$  = largura do corpo de prova [mm];

$h_{sp}$  = distância entre a ponta do entalhe e a face superior do corpo de prova [mm].



O Código Modelo da *fib* (2012) considera valores que estão associados ao Estado Limite de Serviço (ELS;  $CMOD_1 = 0,5$  mm;  $f_{R1k}$ ) e ao Estado Limite Último (ELU;  $CMOD_2 = 2,5$  mm;  $f_{R3k}$ ). É estabelecida a relação mínima  $\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} \geq 0,4$ , a fim de garantir uma parcela mínima de ductilidade ao material. Ainda, a substituição, mesmo que parcial, das armaduras de aço no ELU só é possível se  $\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \geq 0,5$ .

### **4.3 ABNT NBR 16055:2012 - Paredes de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos (2012)**

Tendo em vista que o objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade do emprego de concreto reforçado com fibras em elementos estruturais, onde serão consideradas paredes e lajes constituídas por este material, serão discutidas, nesse item, as premissas básicas de dimensionamento do sistema construtivo de paredes de concreto, as quais são indicadas na ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), que apresenta critérios para a consideração do sistema construtivo de paredes de concreto. Os procedimentos para lajes podem ser seguidos de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), em conjunto com a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021).

Segundo definição da ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), parede de concreto é o elemento em que o comprimento da seção transversal é maior ou igual a dez vezes a sua espessura, podendo ser aplicada para edificações de qualquer altura, sem limitação quanto ao número de pavimentos, respeitando a máxima resistência a compressão do concreto de 40 MPa. Quanto à espessura das paredes, é definido que em edifícios de até 2 pavimentos a espessura deve ser maior ou igual a 8 cm e, para edifícios com mais de 2 pavimentos a espessura deve ser maior ou igual a 10 cm.

Ainda que o modelo construtivo de parede de concreto possa ser utilizado para edifícios sem limitação quanto ao número de pavimentos, a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012) se aplica, integralmente, aos edifícios simplificados. Um edifício simplificado, por sua vez, é limitado em até 5 pavimentos, apresentando lajes maciças com vão livre máximo de 4 m,

sobrecarga máxima de 300 kgf/m<sup>2</sup> e altura de piso a piso de no máximo 3m. As paredes devem estar submetidas à carga axial, com ou sem flexão, e concretadas de modo que as lajes sejam solidarizadas as paredes, tornando o sistema monolítico. Assim, as lajes funcionam como diafragmas rígidos, transferindo os esforços para as paredes.

Com as condições acima sendo respeitadas, admite-se válida a análise elástico-linear para o cálculo dos esforços característicos e análise das situações de serviço. Ainda, pode-se admitir a utilização da análise linear para obtenção dos esforços solicitantes nas situações do ELU. Nesse caso, deve-se considerar a deformação por flexão e cisalhamento nas paredes, e a interação entre as paredes que se interceptam deve ser incluída no modelo.

Uma das principais verificações a serem feitas no dimensionamento de paredes de concreto é a comparação entre a máxima tensão normal de compressão com a resistência última à compressão. A expressão de resistência última à compressão, apresentada pela ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), é exposta na Equação 2 abaixo:

$$\eta_{d, resist} = \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{k_1 [1 + 3k_2 (2 - k_2)]} \leq \frac{(0,85 \cdot f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{1,643} \leq 0,4 \cdot f_{cd} \cdot t \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

$\eta_{d, resist}$  = resistência última à compressão por unidade de comprimento;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão do concreto;

$\rho$  = taxa geométrica da armadura vertical da parede, limitada a 1%;

$t_p$  = espessura da parede;

$f_{scd}$  = resistência de cálculo do aço à compressão;  $f_{scd} = \frac{E_s \cdot 0,002}{\gamma_s}$ ;

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço;

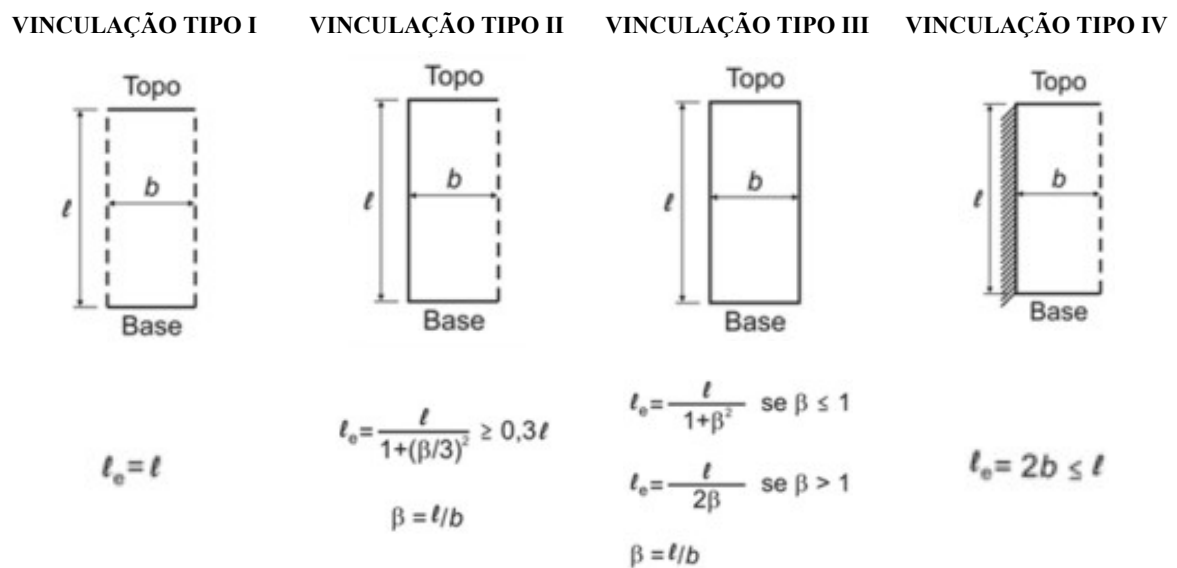
$\gamma_s$  = coeficiente redutor de resistência do aço igual a 1,15.

Os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  consideram a minoração da resistência última à compressão referente à instabilidade localizada causada por efeitos de 2ª ordem. Eles dependem do valor de  $\lambda$ , obtido através da seguinte Equação:

$$\lambda = \frac{l_e \sqrt{12}}{t} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde  $\lambda$  é o índice de esbeltez da parede e  $l_e$  é o comprimento equivalente da parede, definido na Figura 23 abaixo, em função das suas vinculações.

Figura 23 – Definição do comprimento equivalente, conforme vinculações da parede



(fonte: ABNT NBR 16055:2012)

Assim,  $k_1$  é definido por  $k_1 = \frac{\lambda}{35}$ , para qualquer valor de  $\lambda$ . Já  $k_2$  é igual a zero quando o índice de esbeltez estiver no intervalo  $35 \leq \lambda \leq 86$ . Caso o índice de esbeltez esteja no intervalo entre  $86 < \lambda \leq 120$ ,  $k_2$  é definido pela Equação 4:

$$k_2 = \frac{(\lambda-86)}{120} \quad (\text{Eq. 4})$$

A expressão de  $\eta_{d,resist}$  inclui a excentricidade mínima transversal ao plano médio da parede, que deve ser considerada, e tem valor igual ao maior valor entre: excentricidade obtida por pressão de vento de  $1\text{tf/m}^2$ , apenas para o caso de paredes externas, ou, excentricidade obtida pela expressão  $(1,5 + 0,03 \cdot t)$ , onde  $t_p$  é a espessura da parede, válida para todas as paredes. Dessa forma, conforme premissa de dimensionamento da ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), para dimensionar uma parede basta verificar as tensões normais de flexo-compressão no plano da parede.

Ainda, é importante mencionar que a ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012) considera o coeficiente redutor de resistência à compressão do concreto  $\gamma_c$  igual a  $1,4 \times 1,2 = 1,68$ .

#### **4.4 ABNT NBR 16935:2021 – Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras – Procedimento (2021)**

Em dezembro de 2018, a ABNT criou a comissão de estudo para o desenvolvimento da normativa relacionada ao CRF, cujo escopo compreendia os parâmetros de projeto, especificação das macrofibras para concreto, preparação e o controle de concreto reforçado com fibras. Então, publicada em fevereiro de 2021, a ABNT NBR 16935:2021 estabelece os requisitos de desempenho mecânico para estruturas de concreto reforçado com fibras, para atuação isolada ou em conjunto com armaduras, para elementos estruturais que apresentem capacidade de redistribuição de esforços considerando a interface com meio elástico, dimensionados e verificados no estado limite último (ELU) e no estado limite de serviço (ELS).

Usando o Código Modelo da *fib* (2012) como base para sua formulação, a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) estabelece os requisitos específicos relativos ao projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras, em complemento aos requisitos gerais da NBR 6118. Quanto à sua aplicação, ela pode ser empregada, assim como no Código Modelo da *fib* (2012), às estruturas de concreto reforçado com fibras, identificadas por massa específica seca maior do que  $2.000 \text{ kg/m}^3$ , não excedendo  $2.800 \text{ kg/m}^3$ , do grupo I de resistência (C20 a C50), conforme classificação da NBR 8953. Não se aplica aos requisitos para o dimensionamento de revestimento de túneis executados em concreto projetado reforçado com fibras. Também não se aplica aos requisitos para evitar os estados-limite gerados por certos tipos de ações, como sismo, impacto, explosões e fogo.

Essa norma permite utilizar a resistência a tração do concreto com fibras que, dependendo da dosagem é maior que a do concreto convencional, para reduzir ou eliminar a taxa de armadura convencional. Para isso, a norma prevê que no dimensionamento à flexão, considerando o ELU, pode ser usada a resistência a tração do concreto com fibras, assim como é possível dimensionar, em termos de cisalhamento, um ganho para a força cortante devido à adição de fibras na matriz

Para elementos sujeitos às solicitações de torção e cortante, a norma considera que o uso de fibras aumenta a sua capacidade de resistência, mas ainda não disponibiliza modelos para consideração de tal ganho em projeto. Assim, nesse caso, os modelos devem ser comprovados por meio de experimentos em elementos de tamanho real, o que, muitas vezes, pode tornar o uso de fibras pouco vantajoso ou até mesmo inviável.

A ABNT NBR 16935:2021 exige que sejam feitos ensaios para os traços desejados de concreto, de acordo com o teor de fibras inserido. Essa norma não estabelece quantidades já pré-definidas de fibra a serem adicionadas ao concreto, pois dependerá do tipo e características das fibras. Logo, sempre será necessário realizar ensaios para se obter parâmetros indispensáveis para realizar o dimensionamento da estrutura.

A ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) admite como sendo válida a análise elástico-linear para obtenção dos esforços solicitantes e para análise das situações de serviço. Ainda, na falta de modelo mais preciso, para a análise das situações de ELU, admite-se a utilização dos

esforços solicitantes obtidos pela análise linear, com o objetivo de se determinar as resultantes das tensões solicitantes que devem ser utilizadas no dimensionamento.

Para a determinação dos valores de resistências de tração indireta a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) adota o ensaio de flexão de 3 pontos em corpos de prova com entalhe. Esse método de ensaio de flexão é estabelecido pela ABNT NBR 16940:2021 (ABNT, 2021) e se assemelha ao ensaio estipulado pela norma europeia EN14651 (2007) utilizada na formulação do Código Modelo da *fib* (2012). Os dois ensaios sugerem moldes de corpos de provas com dimensões de 150mm de largura X 150mm de altura X 550mm de comprimento, permitindo haver variação no comprimento.

Dessa forma, a partir do ensaio especificado pela ABNT NBR 16940:2021 (ABNT, 2021), é possível se obter os valores experimentais das resistências residuais à tração na flexão,  $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  e  $f_{R4}$ . Com isso, o ensaio de flexão de 3 pontos com entalhe apresenta os valores médios das resistências à tração na flexão. Tais parâmetros são necessários para a aplicação das equações em projeto, devendo ser transformados em valores característicos de projeto, através da Equação 5 simplificada abaixo:

$$f_{R,k} = 0,7 \cdot f_R \quad (\text{Eq. 5})$$

Ainda, a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) estabelece as mesmas condições mínimas para a consideração da influência das fibras sobre a diminuição da armadura que o Código Modelo da *fib* (2012), devendo seguir as condições:

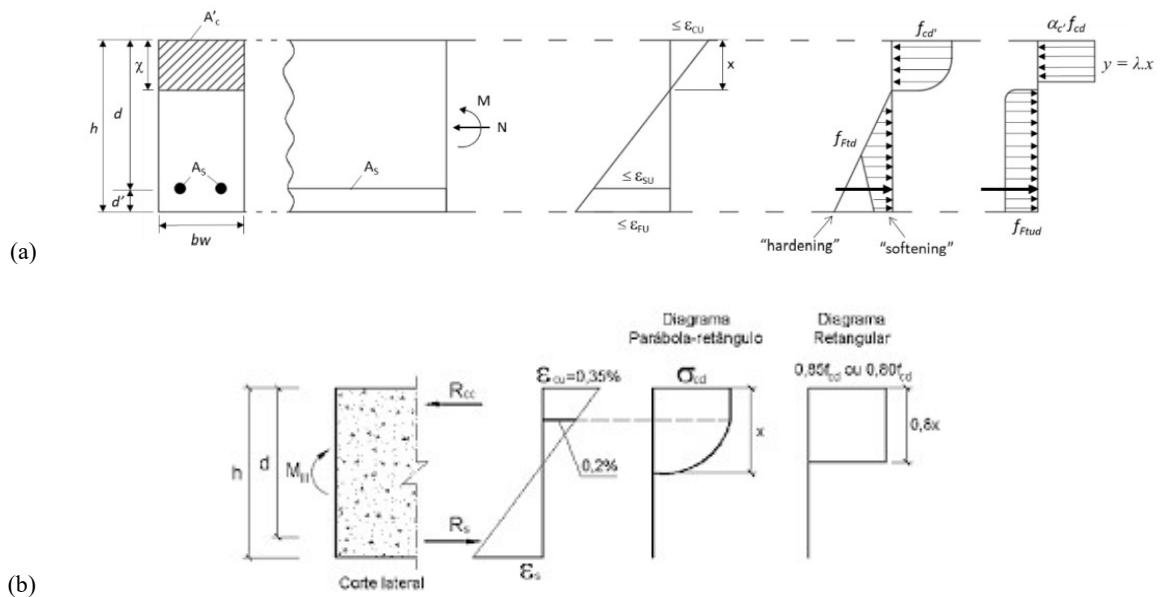
$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} \geq 0,4 \quad \text{e} \quad \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \geq 0,5 \quad (\text{Eq. 6 e Eq. 7})$$

#### 4.4.1 Cálculo da flexão simples no ELU

As mesmas hipóteses de cálculos do concreto armado (CA) podem ser consideradas na aplicação do CRF, observando a diferença de que para o CA, as tensões de tração são desprezadas, enquanto para o CRF, é assumido um material homogêneo com resistência na pós

fissuração. Assim, o CRF se comporta conforme o diagrama de tensões e deformações apresentado na Figura 24 (a) abaixo:

Figura 24 – Diagrama de tensão e deformação no ELU para momento fletor e força normal do CRF (a) e CA (b)



(fonte: ABNT NBR 16935:2021 (a) e ABNT NBR 6118:2014 (b))

É possível observar que a distribuição de tensões no CRF possui grande semelhança com o diagrama convencional para o concreto armado, apresentado pela ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), e exemplificado na Figura 24 (b), sendo diferenciado apenas na parcela de resistência à tração que o CRF apresenta.

Com isso, é possível dizer que as tensões de compressão do concreto são dadas por um retângulo de base  $\alpha_c \cdot f_{cd}$  e altura  $y = \lambda \cdot x$ , para seções em que não há diminuição da seção transversal. Aqui deve-se considerar que para concretos com  $f_{ck} \leq 50MPa$ :  $\alpha_c = 0,85$  e  $\lambda = 0,8$ .

A ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), considera três condições para atingir o ELU, sendo a primeira a máxima deformação de compressão no CRF,  $\epsilon_{cu}$ , onde o valor máximo de

$\varepsilon_{cu}$  é assumido igual a 3,5%. A segunda é a máxima deformação de tração no aço (se existir),  $\varepsilon_{su}$ , onde o valor máximo de  $\varepsilon_{su}$  é assumido igual a 10%. A terceira condição para atingir o ELU é a deformação última do CRF, sendo que neste caso, nos elementos estruturais contendo apenas o CRF e comportamento *hardening*, pode-se considerar o mesmo  $\varepsilon_{Fu}$ ; então, deve-se assumir que para distribuições de tensões variáveis ao longo da seção transversal,  $\varepsilon_{Fu} = 20\%$  e para distribuição de tensões de tração constantes ao longo da seção transversal,  $\varepsilon_{Fu} = 10\%$ .

No item 5.6 da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) estão expostos os coeficientes de ponderação aos parâmetros de resistência pós-fissuração no ELU. A Tabela 1 abaixo expõe os mesmos de forma resumida. Para o ELS, os coeficientes de ponderação dos materiais podem ser considerados igual a 1,0.

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação para o uso do CRF, segundo a ABNT NBR 16935:2021

Resistência à compressão do CRF	$\gamma_c = 1,4$
Resistência à tração do CRF	$\gamma_c = 1,5$
Resistência residual do CRF	$\gamma_c = 1,5$

A ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) considera duas leis constitutivas, do mesmo modo que o Código Modelo da *fib* (2012). O modelo rígido plástico e o modelo linear são utilizados para aplicação em seções solicitadas à tração como forma de obter as resistências à tração direta de serviço,  $f_{Fts}$ , e última,  $f_{Ftu}$ .

Para o modelo rígido-plástico o momento resistente de cálculo é dado conforme a Equação 8 abaixo:

$$M_{Rd} = M_{Ad} + M_{ud} \quad (\text{Eq. 8})$$

Esse modelo tem como pressuposto que toda a resistência de compressão é concentrada na parte superior da seção – caso particular para seções de vigas, submetidas ao efeito de



momentos fletores positivos –, no qual o momento resistente de cálculo proveniente das resistências residuais do CRF,  $M_{ud}$ , é somado ao momento resistente de cálculo na armadura,  $M_{Ad}$ , que, por sua vez, é calculado pelo equilíbrio da seção transversal do concreto armado sem fibras. Para encontrar a posição da linha neutra do elemento estrutural o equacionamento deve seguir os mesmos passos para o concreto armado, abordados na ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). Assim, deve-se encontrar o valor resistente devido à utilização de armadura e realizar o cálculo conforme a Equação 9 abaixo:

$$x = \frac{d + 2 \cdot \left( \frac{M_{Ad}}{\alpha_c \cdot b_w \cdot f_{cd}} \right)}{\lambda} \quad (\text{Eq. 9})$$

Caso a armadura do elemento seja conhecida, é possível utilizar a Equação 10 abaixo:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{\alpha_c \cdot \lambda \cdot f_{cd} \cdot b_w} \quad (\text{Eq. 10})$$

Pensando na abordagem da utilização do modelo linear, é necessário realizar o equilíbrio da seção transversal, com base no diagrama apresentado na Figura 24. A partir disso, é possível obter a resultante do concreto comprimido,  $R_{cc}$ , a resultante do concreto tracionado,  $R_{ct}$ , e a resultante na armadura tracionada,  $R_{st}$ , de acordo com as Equações 11 a 13 abaixo:

$$R_{cc} = \sigma_c \cdot A_c = (\alpha_c \cdot f_{cd}) \cdot b_w \cdot y \quad (\text{Eq. 11})$$

$$R_{ct} = f_{Ftud} \cdot (h - x) \cdot b_w \quad (\text{Eq. 12})$$

$$R_{st} = A_s \cdot f_{sd} \quad (\text{Eq. 13})$$

A partir disso, o cálculo do momento no centro de gravidade (CG) da armadura longitudinal, que possibilita a obtenção da linha neutra do elemento estrutural, é apresentado na Equação 14 abaixo:

$$M_{CG,armadura} = M_{Rd} = R_{cc} \left[ d - \frac{y}{2} \right] - R_{ct} \left[ \left( \frac{h-x}{2} \right) - d' \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

Nos casos em que a armadura longitudinal é conhecida, é possível obter a linha neutra com o auxílio da equação 15 a seguir:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{sd} + f_{ftud} \cdot h \cdot b_w}{f_{ftud} \cdot b_w + 0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w} \quad (\text{Eq. 15})$$

A ABNT NBR 16935:2021 define, ainda, que o uso de armaduras pode ser dispensado, podendo ser utilizado somente o reforço em fibras, se uma das condições abaixo for atendida:

$$\delta_u \geq 20\delta_{ELS} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\delta_{PICO} \geq 5\delta_{ELS} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde os parâmetros são definidos conforme seção 6.5 da ABNT NBR 16935:2021 e expostos abaixo:

$\delta_u$ : é o deslocamento último correspondente à força última ( $F_u$ );

$\delta_{PICO}$ : é o deslocamento de pico correspondente à carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ )

$\delta_{ELS}$ : é o deslocamento de estado-limite de serviço de força obtida pela realização da análise linear com hipótese de não fissuração na condição inicial.

#### 4.4.2 Cálculo da força cortante

Três casos são considerados nos procedimentos de cálculo da força cortante, segundo a ABNT NBR 16935:2021.

O primeiro caso considera elementos lineares de CRF sem armaduras, longitudinal e transversal, onde a tensão resistente de tração de cálculo ( $\sigma_1$ ) não pode ultrapassar o valor da resistência à tração indireta experimental obtida por meio do ensaio de flexão, ou seja, a relação  $\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_c}$  deve ser respeitada.

O segundo caso considera elementos lineares de CRF com armadura longitudinal e sem a armadura transversal e o terceiro caso abrange os elementos lineares com armadura longitudinal e transversal. Em ambas as situações, o cálculo da resistência à cortante do elemento estrutural é dado pela Equação 18 abaixo:

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{sw} \quad (\text{Eq. 18})$$

Observa-se que o cálculo da resistência ao cortante do elemento estrutural é a soma da parcela resistida pelo material armado transversalmente, através do coeficiente  $V_{sw}$ , com a parcela resistida pelo material armado longitudinalmente, através do coeficiente  $V_{Rd,F}$ . A parcela  $V_{sw}$  é calculada conforme a ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), onde caso o elemento não tenha armaduras transversais basta considerar essa parcela como nula. Já a parcela  $V_{Rd,F}$  deve ser calculada com base nas Equações 19 a 23 abaixo, retiradas da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021):

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[ 100 \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{Eq. 19})$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (\text{Eq. 20})$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq. 23})$$

Além disso, no que diz respeito a armadura de cisalhamento, a ABNT NBR 16935:2021 considera que se for respeitada a relação  $f_{F_{tuk}} \geq 0,08 \times \sqrt{f_{ck}}$  (Eq. 24), o uso de estribos pode ser dispensado. Essa vantagem é visualizada, principalmente, na montagem e execução de vigas, o que acaba facilitando o sistema construtivo.

#### 4.4.3 Reforço Mínimo para o Controle de Fissuras

Segundo especificações da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), é possível dispensar as armaduras mínimas para controle de fissuração dos elementos submetidos à flexão se a condição abaixo for atendida:

$$\sigma_1 \leq f_{Ftsm} \quad (\text{Eq. 25})$$

No caso em que a condição acima não seja satisfeita, a utilização de armadura para controlar a fissuração dos elementos submetidos à flexão se faz necessária e ela deve ser calculada por meio da Equação 26 abaixo:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (\text{Eq. 26})$$

onde:

$f_{ctm}$  = resistência média do concreto à tração direta, estimada como sendo  $f_t = 0,9f_{ct,sp}$ ;

$f_{Ftsm}$  = resistência média à tração direta do CRF;

$A_{ct}$  = parcela da seção transversal do concreto tracionado, considerando a tensão no limite elástico;

$\sigma_s$  = tensão máxima no aço no estágio de fissuração, podendo ser considerado igual à tensão de escoamento do aço;

$k_c$  = coeficiente que considera a distribuição da tração na seção transversal um pouco antes da fissuração e da alteração do braço de alavanca interno. Para seções retangulares  $k_c=1$ ;

$k$  = coeficiente que considera a não uniformidade das tensões internas no concreto reforçado com fibras e armadura convencional. Para vigas com altura de mesa inferior a 300mm, considerar  $k=1$ .

Quando o valor de  $A_{s,min}$  é negativo, considera-se como armadura mínima apenas o reforço que a fibra proporciona ao concreto.

## 5. Estudo de Caso

### 5.1 Metodologia

Primeiramente será realizada a descrição do edifício em estudo, apresentando seu projeto arquitetônico e particularidades. Serão apresentadas as cargas que influenciarão na estrutura e demais considerações necessárias para o estudo de caso. O pré-dimensionamento das lajes será efetuado na sequência, utilizando o método das charneiras plásticas (Carvalho, 2014; Campos Filho, 2014).

Na sequência, será avaliado o dimensionamento lajes, conforme parâmetros no ELU e ELS (Carvalho, 2014; Campos Filho, 2014). Será considerado o emprego de concreto reforçado com fibras de aço, utilizando como base as premissas estipuladas pela ABNT NBR 16935:2021 Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento (ABNT, 2021) e com o auxílio da ABNT NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014).

Como mencionado no capítulo 4 desse trabalho, é indispensável, para o uso do CRF em dimensionamentos e verificações de elementos estruturais, a realização de ensaios de caracterização do material. As resistências residuais precisam ser conhecidas e obtidas para que sejam realizados dimensionamentos ou verificações. A realização de tais ensaios apresenta-se como uma das delimitações dessa pesquisa. Dessa maneira, buscou-se na literatura valores de ensaios realizados que possam ser utilizados para o dimensionamento do edifício em estudo. Dado isso, será empregado no desenvolvimento desse trabalho um concreto reforçado com fibras de aço produzido e avaliado por Amin e Foster (2016). Este CRF apresentou uma proporção volumétrica de fibra  $V_f$  igual a 0,5% e relação comprimento da fibra ( $l_f$ ) sobre diâmetro da fibra ( $d_f$ ) igual a 66,7. Assim, a Tabela 2 abaixo apresenta o valor de resistência de tração direta ( $f_{ct}$ ), tensão residual quando  $CMOD_1=0,5mm$  ( $f_{R1}$ ), tensão residual quando  $CMOD_3=1,5mm$  ( $f_{R3}$ ), valor da força cortante obtida experimentalmente no momento da ruptura ( $V_{EXP}$ ), valor do momento obtido na ruptura ( $M_{EXP}$ ) e ângulo do plano de ruptura à força cortante ( $\theta_{exp}$ ).

Tabela 2 – Resultados experimentais obtidos da literatura

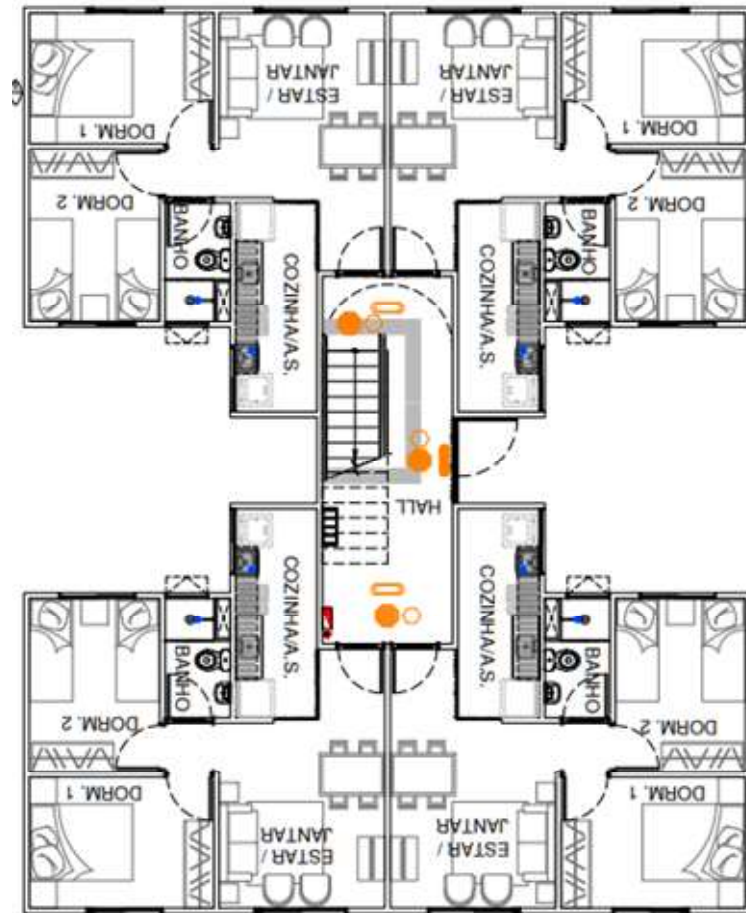
Resultados Experimentais								
V <sub>f</sub> (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	F <sub>ctm</sub> (MPa)	f <sub>l</sub> (MPa)	f <sub>R1</sub> (MPa)	f <sub>R3</sub> (MPa)	V <sub>exp</sub> (kN)	M <sub>exp</sub> (kN.m)	O <sub>exp</sub>
0,5	25	3,15	4,57	2,39	2,56	363	635,25	50

É importante mencionar que não foram levadas em consideração as particularidades da matriz de concreto para a aplicação no estudo de caso das lajes, tais como a interação entre a fibra e o agregado, dimensões da fibra utilizada, aderência entre fibra e matriz, entre outras, sendo esses fatores indispensáveis para uma aplicação real. A caracterização do concreto utilizado é uma delimitação desse trabalho e não será abordada.

## 5.2 Projeto Arquitetônico e Lançamento Estrutural

O estudo de caso tem início com a definição do projeto arquitetônico, devido à importância de compreender as particularidades e desafios do projeto para, na sequência, realizar o lançamento estrutural dos elementos. A planta arquitetônica utilizada para este trabalho é uma planta de um prédio residencial multifamiliar. O edifício é composto de 5 pavimentos, sendo todos considerados como pavimentos tipo, para simplificação dos cálculos, e será considerado pé direito de 2,60m. Determinou-se que o edifício está localizado em Porto Alegre – RS, com paredes e lajes de concreto de 25 MPa, reforçado com fibras, cuja espessura será determinada na sequência. Foi escolhida para o desenvolvimento do projeto a planta arquitetônica representada na Figura 25 abaixo, que apresenta simetria para o edifício, o que evita solicitações de torção e otimiza os cálculos.

Figura 25 – Planta arquitetônica do edifício



(fonte: elaborada pelo autor)

### 5.2.1 Lançamento Estrutural

O estudo de caso leva em consideração que a execução do edifício será em paredes e lajes de concreto com fibra de aço. Desta forma, buscou-se uma planta que possui simetria nos eixos longitudinal e transversal, a fim de garantir que seja maximizada a produtividade desse método e as verificações sejam simplificadas a um único quadrante e, quando finalizadas, projetadas para os demais. O fato de que paredes e lajes são concretadas em conjunto impõe que suas ligações sejam do tipo engastamento perfeito. Ainda, considera-se que existe uma modulação para as dimensões horizontais e verticais, utilizando-se múltiplos de 10cm, a fim de favorecer o sistema de formas para que os painéis possam ser reutilizados em outras construções. Os vãos considerados na planta arquitetônica são projetados de modo a não serem muito pequenos, para evitar o uso de vários painéis de formas, o que reduz a velocidade de montagem e produção. A



escada será considerada em concreto armado e não será realizado seu o dimensionamento. Esta é uma das delimitações do presente estudo, juntamente com o dimensionamento das fundações.

Será avaliada a viabilidade da utilização do concreto reforçado com fibras de aço nas lajes. Para tanto, serão respeitados os critérios determinados na seção 5.2.3 da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) e expostos no capítulo 4 desse trabalho. As paredes não serão verificadas e foram consideradas apenas para definir a vinculação, fator que é essencial para o dimensionamento desta configuração estrutural em concreto.

Conforme indicado na seção 11.2 da ABNT NBR 16055:2012 (ABNT, 2012), a laje será verificada como solidária com as paredes resistentes, com engastes perfeitamente rígidos, de forma que transfira para as paredes os esforços horizontais. Em conjunto com a ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) serão utilizadas as considerações da ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). Para o cálculo das reações das lajes será utilizado o método das charneiras plásticas. Não serão consideradas ações horizontais.

## 5.3 Verificações

### 5.3.1 Pré-dimensionamento

Para a verificação do pré-dimensionamento das lajes do edifício devem ser considerados os seguintes critérios expostos abaixo:

- Altura  $h$  das lajes igual a 10 cm;
- Concreto C25 reforçado com fibra de aço, conforme item 5.1;
- Carga variável nas lajes conforme Tabela 10 da ABNT NBR 6120:2019 (ABNT, 2019);
- Classe de agressividade ambiental II;
- Quando necessário o uso de armaduras, será considerada espessura mínima do cobrimento  $c = 2,0\text{cm}$ , com  $\Delta c = 5\text{mm}$ ;
- Coeficientes de ponderação  $\gamma_c = \gamma_f = 1,4$ ;  $\gamma_s = 1,15$ .
- Peso específico do concreto ( $\gamma_{\text{concreto}}$ ) de  $24 \text{ kN/m}^3$ ;
- Altura de 2,6 m para as paredes, considerando laje a laje;

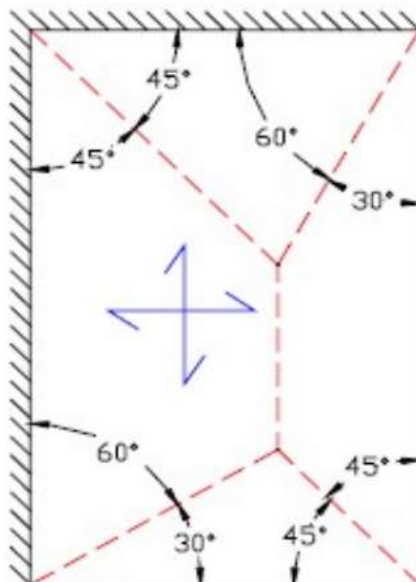
- A argamassa do contrapiso de traço 1:3 (em volume), sendo considerado o peso específico ( $\gamma_{\text{CONTRAPISO}}$ ) de 21 kN/m<sup>3</sup>, conforme a ABNT NBR 6120:2019;
- Piso em Lajotas cerâmicas, com peso específico ( $\gamma_{\text{PISO}}$ ) de 18kN/m<sup>3</sup>, conforme ABNT NBR 6120:2019.

### 5.3.1.1 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas

Para a verificação das lajes é utilizado o método das charneiras plásticas, ilustrado na Figura 26. Segundo a ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas com os seguintes ângulos a partir dos vértices:

- 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
- 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for simplesmente apoiado;
- 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

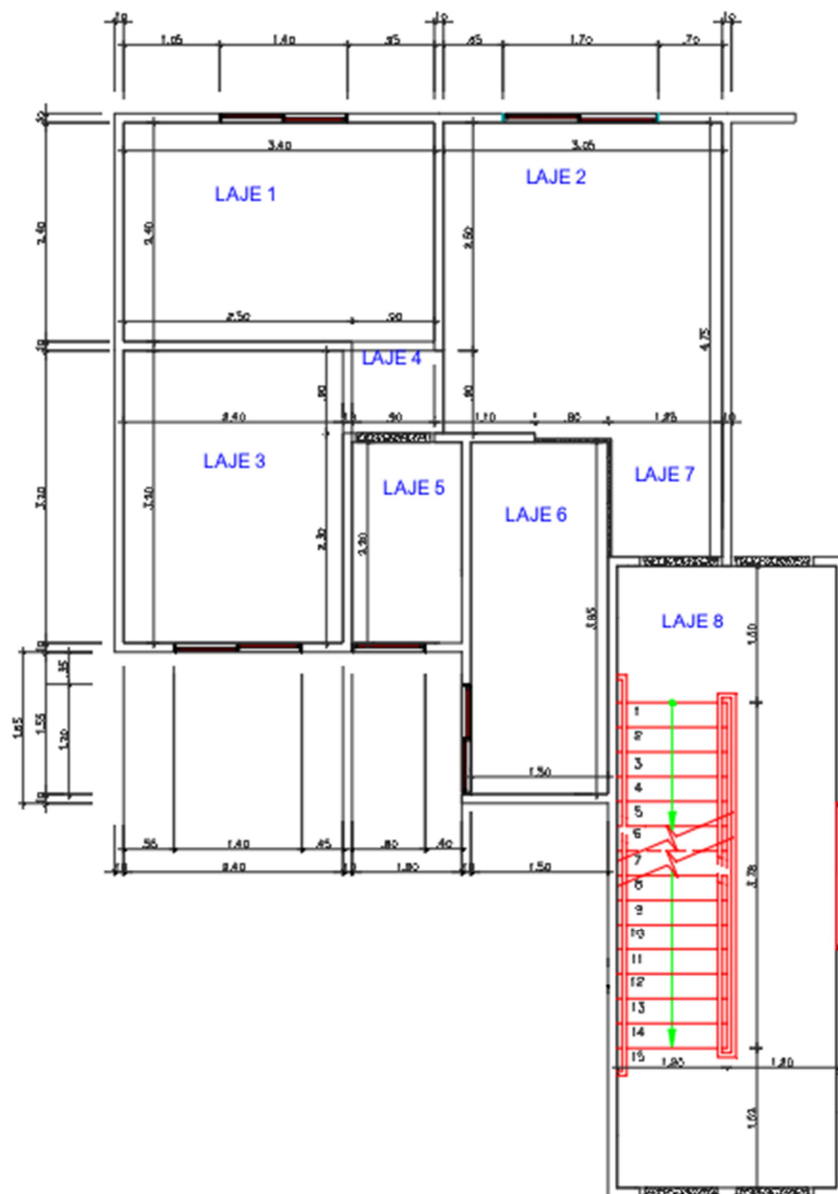
Figura 26 – Método das Charneiras Plásticas



(fonte: adaptado de ABNT NBR 6120:2019)

Ainda, é considerado o método construtivo de paredes de concreto, moldadas junto com as lajes, de modo que todas as lajes possuem engastamento perfeito. Para o cálculo dos vãos efetivos, inicialmente, fica decidido que as lajes possuem a mesma espessura, de 10cm. Dessa forma, as lajes foram divididas conforme Figura 27. Novamente apenas um quadrante da planta baixa é apresentado devido à simetria da estrutura.

Figura 27 – Definição das lajes



(fonte: elaborada pelo autor)

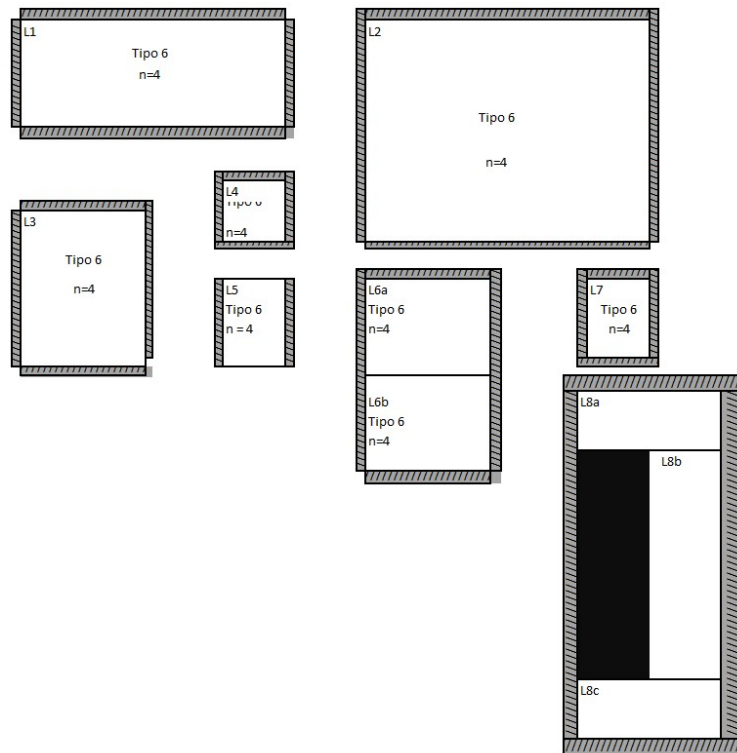
Os vãos efetivos das lajes nas direções principais foram calculados segundo o item 14.6.2.4 da ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), considerando que os bordos são engastados. Os resultados estão expressos na Tabela 3 abaixo, onde o tipo de vinculação é dado em função das várias combinações possíveis de vínculos nas quatro bordas das lajes retangulares, conforme numeração sugerida nas Tabelas de Barés, presentes nos estudos de Pinheiro (1994). A direção da armação das lajes foi dada em função da relação entre suas dimensões.

Tabela 3 – Vãos efetivos das lajes

<b>Vãos Efetivos</b>					
<b>Laje</b>	<b>lx (m)</b>	<b>ly (m)</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Tipo</b>	<b>Observação</b>
1	2,56	3,56	1,391	6	Armada em duas direções
2	3,21	3,56	1,109	6	Armada em duas direções
3	2,56	3,36	1,313	6	Armada em duas direções
4	1,06	1,06	1,000	6	Armada em duas direções
5	1,36	2,36	1,735	6	Armada em duas direções
6a	1,66	1,51	0,910	6	Armada em duas direções
6b	1,66	2,5	1,506	6	Armada em duas direções
7	1,41	1,51	1,071	6	Armada em duas direções
8a	2,56	1,52	0,594	6	Armada em duas direções
8b	1,36	3,78	2,779	6	Armada em uma direção
8c	2,56	1,66	0,648	6	Armada em duas direções

A Figura 28 abaixo representa a vinculação das lajes:

Figura 28 – Vinculação das lajes nos bordos



(fonte: elaborada pelo autor)

### 5.3.1.2 Altura das Lajes

Para iniciar a verificação das lajes é necessário conhecer suas alturas. Essa estimativa pode ser realizada com base na altura útil  $d$ , expressa na Equação 27 abaixo:

$$d \cong (2,5 - 0,1 \cdot n) \cdot l^* \quad (\text{Eq. 27})$$

onde:

$d$  = altura útil da laje (cm);

$n$  = número de bordas engastadas da laje;

$l^*$  = dimensão da laje (em metros), sendo:

$$l^* \leq \begin{cases} l_x \\ 0,7 \cdot l_y \end{cases}, \text{ com } l_x \leq l_y \text{ e } l_x, l_y \text{ e } l^* \text{ em metros.}$$

A altura útil  $d$  pode ser definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a face comprimida da seção. Como ainda não está estabelecido se será necessário ou não utilizar armaduras em conjunto com as fibras de aço nas lajes, considerar-se-á um caso hipotético e a favor da segurança, onde é necessário um cobrimento ( $c$ ) de 2cm e armaduras de 10mm de diâmetro ( $\emptyset$ ) para o pré-dimensionamento da altura das lajes. Assim, a altura da laje é calculada conforme Equação 28 abaixo:

$$h = d + c + \emptyset/2 = d + 2,0 + 1,0/2 = d + 2,5cm \quad (\text{Eq. 28})$$

O valor resultante para  $h$  foi arredondado para o inteiro mais próximo, considerando que a altura mínima é de 8 cm para lajes de piso não em balanço. Com isso, os valores encontrados para cada laje estão expressos na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Altura das Lajes

<b>Pré-Dimensionamento da Altura das Lajes</b>						
<b>Laje</b>	<b>lx (m)</b>	<b>ly (m)</b>	<b><math>\lambda</math></b>	<b>0,7*ly</b>	<b>d (cm)</b>	<b>h (cm)</b>
1	2,56	3,56	1,391	2,492	6,230	8,73
2	3,21	3,56	1,109	2,492	6,230	8,73
3	2,56	3,36	1,313	2,352	5,880	8,38
4	1,06	1,06	1,000	0,742	1,855	8,00
5	1,36	2,36	1,735	1,652	3,400	8,00
6a	1,66	1,51	0,910	1,057	2,643	8,00
6b	1,66	2,5	1,506	1,75	4,150	8,00
7	1,41	1,51	1,071	1,057	2,643	8,00
8a	2,56	1,52	0,594	1,064	2,660	8,00
8b	1,36	3,78	2,779	2,646	3,400	8,00
8c	2,56	1,66	0,648	1,162	2,905	8,00

Com os resultados acima, adotou-se  $h=10\text{cm}$  para todas as lajes.

### 5.3.2 Dimensionamento

#### 5.3.2.1 Cálculo das Ações

De acordo com as cargas verticais definidas anteriormente, é possível chegar ao valor das cargas nas lajes. Para as lajes armadas em duas direções, considera-se simplificada a carga (peso) total das paredes uniformemente distribuída na área da laje, de forma que a carga na laje é o peso total das paredes ( $P_{par}$ ) dividido pela área da laje:

$$g_{par} = \frac{P_{par}}{A_{laje}} = \frac{P_{par}}{l_x \cdot l_y} \quad (\text{Eq. 29})$$

É importante considerar a contribuição de carga devido à escada, que será atribuída à laje Lj7. Para a escada, considerou-se a mesma em concreto armado, engastada diretamente nas lajes de cima e de baixo (início e fim da escada). Desta forma a escada foi considerada como bi

engastada, indo metade de sua carga para a laje superior e metade para a laje inferior. O peso próprio dos lances de degraus foi considerado através de sua espessura média e o patamar como uma laje de 10cm, conforme mostra a Tabela 5:

Tabela 5 – Cargas devido à contribuição da escada

<b>Peso Específico</b>	<b>Acid Escada</b>	<b>Espessura Degrau (m)</b>	<b>Área Escada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Gescada (kN)</b>	<b>Qescada (kN)</b>
25	2,5	0,21	4,536	23,814	11,34

Dessa forma, as ações consideradas para cada laje estão expostas na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Ações nas lajes (kN/m<sup>2</sup>)

<b>Laje</b>	<b>Carga Permanente (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga Variável (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga Total (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Lj1	11,11	1,85	12,96
Lj2	12,91	2,47	15,38
Lj3	9,86	1,46	11,31
Lj4	8,35	2,33	10,68
Lj5	15,49	3,01	18,50
Lj6	10,07	2,18	12,26
Lj7	2,97	0,45	3,42
Lj8	5,53	1,30	6,82

### 5.3.2.2 Reações

As reações causadas pelas lajes devem ser calculadas conforme a Equação 30 abaixo:

$$V = v \frac{p \cdot l_x}{10} \quad (\text{Eq. 30})$$



onde:

$V$ : reação de apoio (kN/m)

$v$ : coeficiente tabelado em função de  $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$ , onde:

$v_x$ : reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de  $l_x$ ;

$v_y$ : reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de  $l_y$ ;

$v'_x$ : reação na borda engastada perpendicular à direção de  $l_x$ ;

$v'_y$ : reação na borda engastada perpendicular à direção de  $l_y$ ;

$p$ : valor da carga uniforme atuante na laje (kN/m<sup>2</sup>);

$l_x$ : menor vão da laje (m).

Os coeficientes que auxiliam o cálculo das reações de apoio para as lajes foram retirados das Tabelas de Barés, apresentados no trabalho de Pinheiro (1994). Dessa forma, são encontrados os valores das reações conforme ilustradas na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 – Reações nas lajes

Laje	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	Tipo	$v_x'$	$v_y'$	P	$V_x'$	$V_y'$
1	2,56	3,56	1,391	6	3,2	2,5	12,96	10,62	8,29
2	3,21	3,56	1,109	6	2,75	2,5	15,38	13,58	12,34
3	2,56	3,36	1,313	6	3,1	2,5	11,31	8,98	7,24
4	1,06	1,06	1,000	6	2,63	2,5	10,68	2,98	2,83
5	1,36	2,36	1,735	6	3,56	2,5	18,50	8,96	6,29
6a	1,66	1,51	0,910	6	2,5	2,5	12,26	5,09	5,09
6b	1,66	2,5	1,506	6	3,34	2,5	12,26	6,80	5,09
7	1,41	1,51	1,071	6	2,66	2,5	3,42	1,28	1,21
8a	2,56	1,52	0,594	6	2,5	2,5	6,82	4,37	4,37
8b	1,36	3,78	2,779	6	5	2,5	6,82	4,64	2,32
8c	2,56	1,66	0,648	6	2,5	2,5	6,82	4,37	4,37

### 5.3.2.3 Solicitações de Flexão

A ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) estabelece que se satisfeitas as relações expressas nas Equações 5, 6 e 7, definidas no capítulo 4, pode-se adotar o uso de fibras no concreto.

Ainda, conforme exposto na seção 4.4.1 desse trabalho e determinado pela ABNT NBR 16935:2021, o uso de armaduras pode ser dispensado, podendo ser utilizado somente o reforço em fibras, se uma das condições expressas nas Equações 16 ou 17 forem satisfeitas.

Assim, usando os dados da Tabela 2 (fibras de aço) e do diagrama tensão-deslocamento, elaborados para o concreto utilizado no estudo de caso e presentes no trabalho de Amin e Foster (2016), tem-se que as condições são satisfeitas e a estrutura pode dispensar o uso de armaduras, utilizando apenas o reforço em fibras.

A NBR 16935 considera, ainda, que é possível dispensar as armaduras mínimas para controle de fissuração dos elementos submetidos à flexão se a condição expressa na Equação 24 for atendida.

Assim:

$$\sigma_{R1} = 0,45 * 2,39 = 1,08MPa$$

E para elementos lineares de CRF sem o uso de armaduras, sujeitos à força cortante, tem-se que:

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_c} \quad (\text{Eq. 31})$$

Onde

$f_{Ftuk}$ : é a resistência característica à tração direta do CRF, considerando  $w_u = 1,5$  mm;

$w_u$ : abertura de fissura última;

$\sigma_1$ : é determinado conforme ABNT NBR 16935:2021, seção 7.2.1

Assim, tem-se que as condições são satisfeitas e pode-se seguir com o dimensionamento considerando apenas o reforço com fibras.

Os momentos fletores são calculados com base nas Tabelas de Barés, retirados do trabalho de Pinheiro (1994), para lajes retangulares vinculadas nas quatro bordas. Dessa forma, os momentos fletores podem ser calculados através da equação 32 abaixo:

$$M = \mu \frac{pl_x^2}{100} \quad (\text{Eq. 32})$$

$M$ : momento fletor (kN.m/m)

$\mu$ : coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de  $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$ , onde:

$\mu_x$  e  $\mu_y$ : coeficientes para cálculo dos momentos fletores positivos atuantes nas direções paralelas a  $l_x$  e  $l_y$ , respectivamente;

$\mu'_x$  e  $\mu'_y$ : coeficientes para cálculo dos momentos fletores negativos atuantes nas bordas perpendiculares às direções  $l_x$  e  $l_y$ , respectivamente;

$p$ : valor da carga uniforme atuante na laje (kN/m<sup>2</sup>);

$l_x$ : menor vão da laje (m).

Com isso, são obtidos os momentos expostos na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Momentos Fletores das Lajes

Laje	$l_x$	$l_y$	$\lambda$	Tipo	$m_x$	$m_x'$	$m_y$	$m_y'$	P	M <sub>x</sub>	M <sub>x'</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>y'</sub>
1	2,6	3,6	1,391	6	3,3	7,24	1,7	5,7	12,96	2,79	6,15	1,42	4,84
2	3,2	3,6	1,109	6	2,5	5,9	2	5,52	15,38	3,90	9,35	3,12	8,75
3	2,6	3,4	1,313	6	3,1	6,93	1,8	5,68	11,31	2,28	5,14	1,30	4,21
4	1,1	1,1	1,000	6	2	5,15	2	5,15	10,68	0,24	0,62	0,24	0,62
5	1,4	2,4	1,735	6	3,9	8,09	1,2	5,72	18,50	1,32	2,77	0,39	1,96
6a	1,7	1,5	0,910	6	2	5,15	2	5,17	12,26	0,68	1,74	0,68	1,75
6b	1,7	2,5	1,506	6	3,6	7,59	1,5	5,72	12,26	1,20	2,56	0,50	1,93
7	1,4	1,5	1,071	6	2,3	5,63	2	5,36	3,42	0,22	0,53	0,19	0,51
8a	2,6	1,5	0,594	6	2	5,15	2	5,15	6,82	0,27	0,70	0,27	0,70
8b	1,4	3,8	2,779	6	4,2	8,33	1	5,72	6,82	1,86	3,73	0,43	2,56
8c	2,6	1,7	0,648	6	2	5,15	2	5,15	6,82	0,25	0,65	0,25	0,65

A compatibilização dos momentos pode ser dispensada, se, simplificada, forem adotados os maiores valores de momento, em vez de equilibrar os momentos de lajes diferentes sobre a borda comum.

De acordo com o item 7.5 da ABNT NBR 16935:2021, para análise linear de placas sem armadura longitudinal, o momento solicitante de cálculo deve ser inferior a  $M_{Rd}$ , obtido por meio da equação 33 abaixo:

$$M_{Rd} = \frac{f_{t,d} \cdot t^2}{2} \quad (\text{Eq. 33})$$

onde

$M_{Rd}$ : Momento resistente de cálculo

$f_{Ftud}$ : Resistência de cálculo à tração direta do CRF;  $f_{Ftud} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_c} = 3,21 MPa$

$t$ : Espessura da placa

Dessa forma, o valor de  $M_{Rd}$  é igual a 40,18 kN.m

O momento resistente máximo no ELU é calculado com deformação máxima de compressão de 3,5% e deformação máxima de tração igual a 25%, de acordo com as equações 34 a 38 abaixo (NBR 16935, ABNT 2021):

$$M_u = [T_{21} \left( \frac{0,877h}{2} + 0,075h \right) + T_{22} \left( \frac{0,877h}{3} + 0,075h \right)] / \gamma_m$$

$$M_u = \frac{h^2}{\gamma_m} (0,29\sigma_{r4} + 0,16\sigma_{r1}) \quad (\text{Eq. 34})$$

$$T_{21} = 0,88h\sigma_{r4} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$T_{22} = 0,44h(\sigma_{r1} - \sigma_{r4}) \quad (\text{Eq. 36})$$

$$\sigma_{r1} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (\text{Eq. 37})$$

$$\sigma_{r4} = 0,37 \cdot f_{R4} \quad (\text{Eq. 38})$$

Onde:

$h$ : altura da seção;

$\gamma_m$ : coeficiente de ponderação do CRF;

Viabilidade do Emprego de Concreto Reforçado com Fibras em Elementos de Laje – Estudo de Caso

$f_{R1}$ : resistência residual à tração na flexão em  $CMOD = 0,5$  mm;

$f_{R4}$ : resistência residual à tração na flexão em  $CMOD = 3,5$  mm;

Dessa forma, temos o valor de

$$M_u = 31,814 \text{ kN.m}$$

Quando comparado aos momentos, tem-se que o dimensionamento atende a segurança, não sendo necessários reforços em armaduras de aço.

#### 5.3.2.4 Solicitações de Cisalhamento

A armadura mínima de cisalhamento pode ser dispensada quando for utilizado o CRF e a condição dada pela Equação 24 for satisfeita, sendo:

$$F_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad (\text{Eq. 39})$$

Onde

$f_{Ftuk}$ : é a resistência característica à tração direta do CRF, valor último, considerando  $w_u = 1,5\text{mm}$ ;

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

Assim, tem-se:  $4,50 \geq 0,44$ . Logo, as armaduras de cisalhamento podem ser dispensadas.

Para os elementos de CRF, a seguinte condição deve ser atendida:

$$V_{Rd} \leq V_{Rd,F}$$

Sendo que a resistência ao cisalhamento de projeto, devido à contribuição das fibras, pode ser considerada conforme Equação 40 abaixo:

$$V_{Rd,F} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F} \cdot b_w \cdot d \quad (\text{Eq. 40})$$

Onde

$V_{Rd,F}$ : representa a contribuição do reforço das fibras ao cisalhamento;

$f_{Ftuk}$ : resistência característica à tração direta do CRF, valor último, considerando  $w_u = 1,5\text{mm}$ ;

$b_w$ : é a menor largura da seção transversal na zona de tração;

$d$ : é a altura útil da seção transversal.

Dessa forma, tem-se os resultados expostos na Tabela 9 abaixo para as lajes do edifício em estudo:

Tabela 9 – Verificação das lajes quanto ao cisalhamento

Laje	$l_x$ (m)	$l_y$ (m)	$V_x'$ (kN)	$V_y'$ (kN)	$V_{Rd}$ (kN)	$V_{Rd,F}$ (kN)
1	2,56	3,56	10,62	8,29	18,91	82,2857
2	3,21	3,56	13,58	12,34	25,92	103,179
3	2,56	3,36	8,98	7,24	16,22	82,2857
4	1,06	1,06	2,98	2,83	5,81	34,0714
5	1,36	2,36	8,96	6,29	15,25	43,7143
6a	1,66	1,51	5,09	5,09	10,17	53,3571
6b	1,66	2,5	6,80	5,09	11,88	53,3571
7	1,41	1,51	1,28	1,21	2,49	45,3214
8a	2,56	1,52	4,37	4,37	8,74	82,2857
8b	1,36	1,89	4,64	2,32	6,96	43,7143
8c	2,56	1,66	4,37	4,37	8,74	82,2857

Assim, verifica-se que o dimensionamento atende o cisalhamento.

Por fim, segundo ABNT NBR 16935:2021, nos elementos estruturais em que o CRF tem um comportamento de *softening* pós-fissuração, a verificação das tensões de tração não é necessária se o elemento for verificado no ELU.

## 6. Análise de Resultados e Conclusões

O presente trabalho trouxe um estudo de caso e aplicação da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso do concreto reforçado com fibras como reforço principal de elementos de laje de um edifício residencial. Para tanto, foi avaliado o pré-dimensionamento e dimensionamento das lajes da estrutura, considerando a utilização do sistema de paredes e lajes de concreto moldadas no local.

Para atingir o objetivo do trabalho, primeiramente foram definidas as delimitações do trabalho e ficou determinado que o concreto a ser utilizado no estudo de caso, obedece às características sinalizadas em trabalhos encontrados na literatura. O concreto utilizado é do tipo reforçado com fibras de aço, com 0,50% de volume de fibras adicionadas na mistura e, após as verificações executadas no estudo de caso, mostrou-se satisfatório para o uso proposto, uma vez que atendeu aos pré-requisitos estabelecidos na ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021).

Em seguida, foram definidas as cargas atuantes na estrutura e partiu-se para a verificação do pré-dimensionamento das lajes. Para isso, definiu-se altura inicial pré-determinada de 10 cm para todas as lajes e, devido à simetria da estrutura, apenas metade do prédio foi considerado. O método das charneiras plásticas e as Tabelas de Barés (1970) foram aplicados para o desenvolvimento a avaliação do pré-dimensionamento das lajes. Ao final das verificações, é possível concluir que as lajes podem ser verificar quanto dimensionamento para a altura determinada.

Na sequência partiu-se, então, para a verificação dos critérios da ABNT NBR 16935:2021 (ABNT, 2021) quanto ao dimensionamento das lajes de concreto reforçado com fibra de aço. Realizou-se, então, a determinação das ações nas lajes, com o auxílio da ABNT NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), de acordo com as cargas verticais definidas. Foi realizada a determinação da contribuição de carga da escada, em concreto armado. Com isso, as reações nas lajes foram determinadas, utilizando as Tabelas de Barés adaptadas por Pinheiro (1994). Realizadas as verificações, concluiu-se que as premissas para uso de fibras no concreto foram satisfeitas, e as verificações em relação aos momentos atuantes e resistentes nas lajes e verificações ao cisalhamento foram atendidas, de modo que pode ser dispensado o uso de armaduras para as lajes. As demais condições para o uso de fibras sem adição de armaduras de reforço presentes na ABNT NBR 16935:2021 também foram satisfeitas.



Analisando o resultado do trabalho é possível confirmar o que é exposto a literatura, de que a atuação das fibras se dá de forma mais significativa no aumento ao reforço de tração da peça, quando comparado ao de compressão. Assim, tem-se melhor aplicação nos elementos sujeitos a esse tipo de sollicitação, como é o caso das lajes.

Ainda, o presente trabalho permitiu concluir que, quando comparado o edifício projetado em lajes e paredes de concreto reforçados com fibras de aço à um edifício similar projetado em lajes e paredes de concreto armado, o uso do CRF é uma alternativa que apresenta ganho de agilidade no processo construtivo, otimizando a produção. Por fim, com o dimensionamento do edifício exemplo verifica-se, então, que as condições estão de acordo com o estabelecido na norma e, com base nisso, o cenário brasileiro de construção ganha mais uma ferramenta, onde pode-se executar edifícios utilizando-se como reforço principal as fibras de aço adicionadas ao concreto. Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam adotados desafios quanto à morfologia do edifício, tipos de fibras empregadas ao concreto, carregamentos mais complexos nos elementos, dentre outras possibilidades.

## BIBLIOGRAFIA

AMIN, Ali.; FOSTER, Stephen J.; MITTONI, Aurelio. **Derivation of the  $\sigma$ -w relationship for SFRC from prism bending tests**. KG, Berlin: Structural Concrete, 2015.

AMIN, Ali; FOSTER, Stephen J. **Predicting the flexural response of steel fibre reinforced concrete prisms using a sectional model**. New South Wales, Austrália: Cement and Concrete Composites, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16935:2021 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16055:2012 – Paredes de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15305:2005 – Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro – Procedimentos para o controle de fabricação**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16940:2021 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16938:2021 – Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15530:2019 – Fibras de aço para concreto – Especificações**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8890:2007 – Tubo de concreto de seção circular para água pluvial e esgoto sanitário – Requisitos e métodos de ensaio**.

Birck, M. L. Material pessoal concedido para uso no trabalho. 2021.

BRAGUIM, T. C. **Utilização de modelos de cálculo para projeto de edifícios de paredes de concreto armado moldadas no local**. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

BUTTIGNOL, T.E.T; FERNANDES, J.F; T. N. BITTENCOURT, T.N; J. L. A. O. SOUSA, J. L. A. O. **Verificação de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aço no estado limite último**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, 2018.

CAMPOS FILHO, A. **Projeto de Lajes Maciças de Concreto Armado**. Apostila de aula – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

CARNIO, M. A. **Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização**. Revista IBRACON Concreto & Construções. 87. ed. São Paulo, 2017.

CARVALHO, R.C; PINHEIRO, L.M. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, v1. 1ed. Editora PINI Ltda, 2014.

CORRÊA, M.R.S; RAMALHO, M.A. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Editora Pini, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651: Test method for metallic fiberreinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**, CEN, London., 2007.

FIB BULLETTIN 65. **Model Code 2010, Final draft - Volume 1**. Lausanne: Fédération internationale du béton (fib), 2012.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. **Boletim Técnico**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. et al. **Concretos especiais**. Escola Politécnica – USP, 2004.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto Reforçado com Fibras**. São Paulo. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural**. Congresso Brasileiro de Concreto, 2014.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

LEE, J.-H. **Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete**. Composite Structures, 2017.

JACOMINI, G. M. **Avaliação da capacidade resistente de vigas de concreto armado reforçado com fibras utilizando os procedimentos normativos da ABNT NBR 16935:2021**. Dissertação - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais – 2ª edição**. Ed.: IBRACON, 2014.

MORAIS, I. A. **Sistema Construtivo em Paredes de Concreto: Roteiro Prático para Dimensionamento Estrutural**. Dissertação – Universidade Federal do Pampa, 2018.

PINHEIRO, L. M. **Concreto armado: tabelas e ábacos**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 1994.

Site: [www.neomatex.com](http://www.neomatex.com)