

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAJES MISTAS DE  
CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E FÔRMA  
PERMANENTE DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS**

**LAYANE SILVA SOUZA**

**ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA – DF**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAJES MISTAS DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E FÔRMA PERMANENTE DE POLÍMERO  
REFORÇADO COM FIBRAS**

**LAYANE SILVA SOUZA**

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF

AGOSTO – 2023

**COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAJES MISTAS DE CONCRETO  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E FÔRMA PERMANENTE DE POLÍMERO  
REFORÇADO COM FIBRAS**

**LAYANE SILVA SOUZA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

Banca examinadora:

---

Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, D.Sc (UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Guilherme Santana Alencar, D.Sc (UnB)  
(Examinador 1)

---

Prof. Glaucia Maria Dalfre, D.Sc (UFSCAR)  
(Examinador 2)

Brasília – DF, 16 de agosto de 2023.

## FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, LAYANE SIVA

Comportamento à flexão de lajes mistas de concreto reforçado com fibras de aço e fôrma permanente de polímero reforçado com fibras. [Distrito Federal] 2023.  
xxiv, 112 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2023).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| 1. Polímero Reforçado com Fibra (PRF) | 2. Concreto Armado |
| 3. Estruturas Compósitas              | 4. Lajes mistas    |
| I. ENC/FT/UnB                         | II. Título (série) |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, L. S. Comportamento à flexão de lajes mistas de concreto reforçado com fibras de aço e fôrma permanente de polímero reforçado com fibras. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, **112 p.**

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Layane Silva Souza

TÍTULO: Comportamento à flexão de lajes mistas de concreto reforçado com fibras de aço e fôrma permanente de polímero reforçado com fibras.

GRAU: Mestre      ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Layane Silva Souza

e-mail: layane.scalixto@gmail.com

*“It matters not how strait the gate,  
How charged with punishments the scroll,  
I am the master of my fate:  
I am the captain of my soul.”*

Invictus, William Ernest Henley

## AGRADECIMENTOS

Para todos que estiveram comigo nesta jornada, meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, sou grata a Deus, por ter possibilitado que eu chegasse até aqui.

Ao professor Rodrigo de Melo Lameiras, por propor esse tema e por toda a orientação, estímulo e suporte prestado durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Agradeço aos meus familiares, principalmente meus pais Edmilson e Célia Calixto, pelo apoio, meu esposo, Lucas Peres, por todo o suporte, auxílio durante o preparo dos ensaios, paciência e companheirismo durante todo esse tempo, principalmente por ter embarcado comigo nessa jornada.

Aos meus colegas e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), pelas valiosas lições e conhecimentos compartilhados. Em especial aos amigos Geovanna Andrade, Jon Kennedy, Matheus Galvão, Maurício Martins, Thiago Luiz, Victor Fabrício e Wallas Borges, por terem sido fundamentais em cada etapa deste mestrado.

Agradeço aos coordenadores de laboratório, professor Marcos Honorato, professor Elton Bauer e professor Fábio Castro pelo suporte prestado, e aos técnicos de laboratório Patrícia e Sr. Magno pelo essencial auxílio.

Sou grata à Universidade de Brasília (UnB) e ao PECC, representado pelo coordenador professor Francisco Evangelista Júnior e aos professores examinadores da banca Guilherme Santana Alencar e Glaucia Maria Dalfre, que me deram a honra de aceitar o convite, o qual certamente irá propiciar valorosas contribuições ao texto final desta dissertação.

E por último, mas não menos importante, deixo um agradecimento para a Layane dos últimos dois anos, que traçou essa meta, continuou e persistiu apesar dos obstáculos no caminho, conquistados um por um com muito suor.

## RESUMO

Nos últimos anos, estruturas com fôrmas permanentes fabricadas com materiais compósitos têm ganhado destaque nos meios acadêmicos e na indústria da construção civil. Este destaque é devido à resistência à corrosão, alta capacidade de carga, baixa densidade, resistência à fadiga e facilidade de manuseio do material. No entanto, por se tratar de um novo método, existem desafios a serem superados e escassez de dados experimentais disponíveis por se tratar de um novo método.

Neste trabalho foi proposto um sistema de lajes mistas inovador, constituído por uma fôrma permanente de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CARFA). A fôrma proposta possui uma seção transversal trapezoidal e dupla função na laje mista, sendo fôrma no estágio inicial, e armadura nas condições de uso. Por outro lado, o CARFA foi escolhido para substituir a armadura tradicional utilizada para combater os efeitos da retração, geralmente constituída por uma tela de aço soldada. A escolha pelo CARFA também se deve às suas propriedades inerentes, possibilitando ganhos de produtividade no processo construtivo, e à hipótese levantada de que o uso do concreto com fibras pode conferir um comportamento mais dúctil para o elemento estrutural, a ser verificada nos testes realizados.

O trabalho foi realizado de acordo com as seguintes etapas: 1) revisão bibliográfica; 2) elaboração de um modelo analítico e pré-dimensionamento das lajes; 3) produção das fôrmas permanentes de PRFV; 4) caracterização dos PRFV; 5) produção das lajes mistas; 6) caracterização do CARFA; 7) realização dos ensaios de flexão à quatro pontos e 8) análise dos resultados. O modelo analítico foi inspirado nas normas ABNT NBR 8800, ACI 440.R e ACI 440.2R, desprezando a resistência à tração do concreto e a resistência à compressão do polímero. A produção das fôrmas dividiu-se entre a fabricação de placas retas e a fabricação das fôrmas trapezoidais, sendo realizadas por meio do método de infusão de resina com auxílio do vácuo. Posteriormente, foram caracterizadas pela etapa subsequente por meio do ensaio de tração direta. Após a caracterização dos PRFV foi realizada a produção das lajes mistas, aplicando-se um tratamento de areia na superfície da fôrma permanente de PRFV. A caracterização do concreto se sucedeu após o período de 28 dias e a determinação do comportamento da laje mista se deu por meio do ensaio de flexão à quatro pontos para um vão livre de 1800 mm.

Ao total foram analisados dois tipos de lajes mistas, tendo como parâmetro principal a variação da espessura da fôrma permanente por meio da concentração de fibras unidirecionais

utilizadas. O comportamento de flexão da laje mista revelou um modo predominante de falha por flexão, com deslocamentos significativos e comportamento pseudo-dúctil. As lajes demonstraram uma ação compósita eficaz, com comportamento linear até a carga de desprendimento inicial da fôrma, influenciada pela espessura. Lajes com fôrmas mais espessas apresentaram cargas de desprendimento e deslocamentos menores. O estudo demonstra que a laje mista proposta apresenta comportamento estrutural adequado e tem potencial para ser aplicado na indústria da construção civil.

**Palavras-chave:** Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV); Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CARFA); Fôrma permanente; Estruturas Mistas; Lajes Mistas.



## ABSTRACT

The structures with permanent formwork made of composite materials have gained prominence in the civil construction industry in recent years due to their resistance to corrosion, high load capacity, low density, fatigue resistance, and ease of handling. However, despite the growth of research in this field, being a new method, there are challenges to be overcome and a scarcity of available experimental data. In this work, an innovative system of composite slabs was proposed, consisting of a permanent formwork made of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) and Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC). The proposed component has a trapezoidal cross-section and serves a dual function in the composite slab, acting as formwork in the initial stage and reinforcement in service conditions. On the other hand, SFRSCC was chosen to replace the traditional reinforcement used to counteract the effects of shrinkage, usually consisting of welded steel mesh. The choice of SFRSCC is also due to its inherent properties, allowing for productivity gains in the construction process, and the hypothesis that the use of fiber-reinforced concrete may confer a more ductile behavior to the structural element, which will be verified in the tests carried out. The work was carried out according to the following steps: 1) literature review; 2) development of an analytical model and preliminary design of the slabs; 3) production of permanent GFRP formworks; 4) characterization of GFRP; 5) production of composite slabs; 6) characterization of SFRSCC; 7) four-point bending tests; and 8) analysis of the results. The analytical model was inspired on NBR 8800, ACI 440.R, and ACI 440.2R, disregarding the tensile strength of the concrete and the compressive strength of the polymer. The production of formworks was divided between the manufacture of flat sheets and the manufacture of trapezoidal sheets, carried out using the vacuum infusion method. Subsequently, they were characterized through direct tensile tests. After the characterization of GFRP, the production of composite slabs was carried out, applying a sand treatment to the surface of the permanent GFRP formwork. The characterization of the concrete was carried out after a period of 28 days, and the behavior of the composite slab was determined through four-point bending tests for a clear span of 1800 mm. In total, two types of composite slabs were analyzed, with the main parameter being the variation in the thickness of the permanent formwork through the concentration of unidirectional fibers used. The flexural behavior of the composite slab revealed a predominant mode of failure by bending, with significant displacements and pseudo-ductile behavior. The slabs demonstrated effective composite action, with linear behavior up to the initial detachment load of the formwork, influenced by its thickness. Slabs with thicker sheets showed lower

detachment loads and displacements. The study demonstrates that the proposed composite slab exhibits suitable structural behavior and has potential for application in the civil construction industry

**Keywords:** Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP); Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC); Stay-in-Place formwork; Composite Structures; Composite Slabs;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de seções transversais de lajes mistas de PRFV e concreto. (a) fôrma reta com concreto (Honickman, 2008); (b) fôrma com enrijecedores tipo “t” (Boules <i>et al.</i> , 2023; Goyal <i>et al.</i> , 2022; Nelson <i>et al.</i> , 2013; Oliva <i>et al.</i> , 2007; Zuo <i>et al.</i> , 2018); (c) fôrma com enrijecedores tipo “y” (Pournasiri; Pham; Hao, 2022); (d) fôrma com seção quadrada vazada (Pournasiri; Pham; Hao, 2022); (e) perfil “i” e concreto (Santos Neto, 2006); (f) trapezoidal (Fam; Nelson, 2012); (g) trapezoidal com seção vazada (Siwowski; Rajchel; Wlasak, 2021); (h) trapezoidal com enrijecedores (He <i>et al.</i> , 2012); (i) painel com pur e prfv – <i>easyflor</i> (Mastali; Barros; Valente, 2014; Oliveira, 2018). .....	3
Figura 2 - Esquema representativo da laje mista proposta, composta por fôrma permanente de PRFV e CARFA. ....	4
Figura 3 - Laminação manual. Fonte: Qureshi, 2023. ....	10
Figura 4 - Sistema de pultrusão. Fonte: Qureshi, 2023. ....	10
Figura 5 - Moldagem à vácuo. Fonte: Qureshi, 2023. ....	11
Figura 6 - Laminação à vácuo. Fonte: Qureshi, 2023. ....	12
Figura 7 - Sistema de infusão com auxílio de vácuo. Fonte: Qureshi, 2023. ....	12
Figura 8 – Lajes e vigas compósitas (Honickman, 2008). (a) Laje compósita ensaiada; (b) Viga trapezoidal ensaiada. ....	23
Figura 9 - Laje mista por (He <i>et al.</i> , 2012): (a) Modelo de PRFV utilizado; (b) <i>Setup</i> do ensaio .....	23
Figura 10 – Modelo analisado por Santos Neto (2006). (a) Laje com perfis de PRFV; (b) <i>Setup</i> do ensaio. ....	24
Figura 11 - Modelo estudado por Fam e Nelson (2012). (a) Configuração geométrica; (b) <i>Setup</i> do ensaio. ....	25
Figura 12 - Modelo proposto por Gai <i>et al.</i> (2013): (a) Seção transversal proposta; (b) Realização do ensaio.....	25
Figura 13 - Modelo de laje mista: (a) Modelo da laje. (Nelson <i>et al.</i> , 2013); (b) Set-up do ensaio. (Nelson; Fam, 2014) .....	26
Figura 14 - Estudo realizado por Gonilha, Correia e Branco (2014): (a) Vista frontal (b) Deformação antes da ruptura .....	27
Figura 15 - Modelo de laje proposta por (Fang <i>et al.</i> , 2016): (a) Design proposto; (b) <i>Setup</i> do ensaio .....	28

Figura 16 – Laje proposta por Zuo <i>et al.</i> (2018) e Zuo, Liu & He (2018): (a) Tratamento de areia; (b) Montagem. ....	29
Figura 17 – Vigas compósitas de PRFV em formato trapezoidal. (a) Trabalho inicial de Siwowski e Rajchel, (2019); (b) Continuação da pesquisa por Siwowski, Rajchel e Wlasak (2021).....	29
Figura 18 - Fôrmas de PRFV utilizadas na produção das lajes (Pournasiri; Pham; Hao, 2022). (a) Enrijecedor em “Y”. (b) Seção quadrada vazada. ....	30
Figura 19 - Laje investigada por Goyal <i>et al.</i> , (2022) (a) Modelo da seção transversal; (b) Fôrma de PRFV utilizada.....	31
Figura 20 - Geometria utilizada no modelo analítico. ....	33
Figura 21 - Segmentos da seção efetiva. ....	39
Figura 22 - Esforços internos com a linha neutra acima da fôrma .....	42
Figura 23 - Esforços internos com a linha neutra no alinhamento da fôrma.....	43
Figura 24 - Esforços internos com a linha neutra abaixo da fôrma.....	43
Figura 25 – Área resistente do concreto (hachurada).....	44
Figura 26 - Considerações da seção genérica com LNE na mesa/capa da laje .....	46
Figura 27 - Considerações da seção genérica com LNE na fôrma permanente. (a) Considerações sobre a fôrma; (b) Considerações sobre a nervura.....	46
Figura 28 - Fluxograma para verificação do ELU e ELS da laje mista com fôrma permanente de PRFV .....	49
Figura 29 - Etapas da metodologia utilizada. ....	52
Figura 30 - Geometria das lajes ensaiadas (medidas em milímetros). ....	54
Figura 31 - Fibra de aço utilizada. ....	55
Figura 32 - Modelo de forma negativa para a infusão das fôrmas trapezoidais (medidas em milímetros).....	55
Figura 33 - Partes do sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo. (a) molde negativo; (b) cera carnaúba; (c) <i>peel ply</i> ; (d) <i>flow media</i> ; (e) plástico de vácuo; (f) spiraduto; (g) <i>tacky tape</i> ; (h) manômetro; (i) mangueira; (j) conexões; (k) bomba à vácuo; (l) reservatório de vácuo; (m) reservatório de resina.....	59
Figura 34 - Processo de fabricação placas retas de PRFV - Configuração 1. ....	61
Figura 35 - Processo de fabricação placas retas de PRFV - Configuração 2 .....	61
Figura 36 – Processo de fabricação das fôrmas trapezoidais de PRFV. – Configuração 3.....	61
Figura 37 - Distribuição das fibras nos tipos de fôrmas produzidas. ....	62

Figura 38 – Fabricação das placas planas. (a) demarcação dos pontos de corte; (b) corte dos materiais; (c) aplicação de cera desmoldante; (d) primeira camada de <i>peel ply</i> ; (e) camadas de fibra de vidro; (f) última camada de <i>peel ply</i> ; (g) <i>flow media</i> ; (h) montagem final para infusão. ....	63
Figura 39 - Protótipo da fôrma trapezoidal. (a) esquema de infusão. (b) peça infundida .....	64
Figura 40 – Etapas de fabricação das fôrmas de PRFV. (a) posicionamento da fibra de vidro unidirecional 700g; (b) posicionamento da fibra de vidro CSM; (c) visualização total de todas as camadas de fibra; (d) posicionamento do <i>flow media</i> ; (e) posicionamento do plástico para vácuo; (f) visualização do saco de vácuo com pressão aplicada; (g) visualização saco de vácuo após a infusão; (h) visualização da fôrma trapezoidal após o desmolde. ....	65
Figura 41 - Preparo dos corpos de prova para ensaio de tração direta. (a) Corte na Serra Mármore; (b) Modelo utilizado para Ensaio; .....	67
Figura 42 - Ensaio de Tração direta realizados na MTS. (a) Prensa Utilizada; (b) Extensômetro utilizado. ....	67
Figura 43 - Tratamento na superfície do compósito e fôrma utilizada. (a) Diferença entre superfície Normal x Tratada; (b) Fôrmas executadas;.....	68
Figura 44 – Concreto dos Corpos de prova de lajes mistas. (a) No dia da concretagem; (b) Após a desforma.....	69
Figura 45 - Ensaio de caracterização do concreto endurecido. (a) Ensaio de compressão axial; (b) Ensaio de flexão à três pontos.....	70
Figura 46 - <i>Setup</i> ensaio de flexão a 3 pontos, medidas em mm. (a) Vista frontal; (b) detalhe da instrumentação; (c) vista inferior do <i>setup</i> ; (d) vista lateral. ....	70
Figura 47 - Sistema geral ensaio de flexão a quatro pontos. (a) Vista 3D; (b) Detalhes gerais. ....	72
Figura 48 - Medidas gerais do <i>setup</i> do ensaio (medidas em milímetros). (a) Vista superior; (b) Corte AA.....	72
Figura 49 - Posicionamento extensômetros e LVDTs nos corpos de prova.(a) Visão superior; (b) visão inferior; (c) visão lateral; (d) seção transversal. ....	73
Figura 50 - Detalhes da instrumentação .....	74
Figura 51 - Configuração final da instrumentação .....	74
Figura 52 - Ensaio de tração direta. (a) D4F direção 0°; (b) D6F direção 0°; (c) D8F direção 0°. ....	81

Figura 53 - Ensaio de tração direta – Tensão × Deslocamento. (a) D4F direção 0°; (b) D4F direção 90°; (c) D6F direção 0°; (d) D6F direção 90°; (e) D8F direção 0°; (f) D8F direção 90°.	83
Figura 54 - Ensaio de Tração direta realizados. (a) Ruptura à 0°; (b) Ruptura à 90°.	84
Figura 55 - Valores médios, máximos e mínimos. (a) legenda; (b) espessura; (c) módulo de elasticidade à 0°; (d) resistência à tração à 0°; (e) resistência à tração à 90°.	86
Figura 56 – Caracterização do concreto. (a) espalhamento; (b) corpo de prova retificado; (c) ruptura.	87
Figura 57 - Rupturas dos corpos de prova no ensaio de flexão a três pontos. (a) V01; (b) V02.	88
Figura 58 – Comportamento dos corpos de prova no ensaio de flexão à três pontos. (a) Curva Carga × CMOD; (b) Curva tensão na flexão × CMOD, com tensões residuais demarcadas.	88
Figura 59 - Comportamento à flexão laje D8F. (a) Fissura inicial longitudinal; (b) destacamento da fôrma; (c) deslizamento relativo; (d) configuração do revestimento de areia; (e) ruptura por flexão; (f) deformação local da fôrma; (g) ruptura interna da fôrma; (h) comportamento das fibras de aço.	90
Figura 60 - Comportamento à flexão laje D6F. (a) Fissura inicial longitudinal; (b) destacamento da fôrma; (c) deslizamento relativo; (d) configuração do revestimento de areia; (e) ruptura por flexão; (f) deformação local da fôrma; (g) ruptura interna da fôrma; (h) comportamento das fibras de aço.	92
Figura 61 - Gráfico x deslocamento das lajes submetidas à flexão. (a) D6F eixo central; (b) D6F eixo lateral (c) D8F eixo central; (d) D8F eixo lateral.	94
Figura 62 - Deslizamento horizontal entre o concreto e a fôrma. (a) Laje D6F; (b) Laje D8F.	95
Figura 63 - Carga x Deformação. (a) D6F Eixo central; (b) D6F Eixo Ls; (c) D8F Eixo central; (d) D8F Eixo Ls.	97
Figura 64 - Distribuição de tensão ao longo da seção transversal até o destacamento. (a) Laje D6F; (b) Laje D8F.	97
Figura 65 - Cálculo analítico da flecha com seção homogeneizada × resultados do ensaio até o destacamento da fôrma. (a) Carga × Deslocamento laje mista D6F; (b) Carga × Deslocamento laje mista D8F.	99

Figura 66 - Cálculo analítico da flecha considerando apenas a inércia da fôrma × resultados do ensaio até o destacamento. (a) Carga × Deslocamento laje mista D6F; (b) Carga × Deslocamento laje mista D8F ..... 100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Guias de dimensionamento e normas para estruturas de concreto reforçadas com PRF - adaptado (Zoghi, 2014) e (Ascione <i>et al.</i> , 2016).....	20
Tabela 2 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações .....	36
Tabela 3 - Propriedades da Fibra Unidirecional (dados fornecidos pelo fabricante).....	56
Tabela 4 – Propriedades da Resina Poliéster Escura à 25° C (dados fornecidos pelo fabricante). .....	56
Tabela 5 - Nomenclatura dos corpos de prova ensaiados.....	66
Tabela 6 - Dados iniciais estimados para o pré-dimensionamento. ....	76
Tabela 7 - Comparativo entre momento resistente e momento solicitante.....	78
Tabela 8 - Comparativo entre momento resistente e momento solicitante.....	79
Tabela 9 - Comparativo entre a deflexão máxima e a calculada para a estrutura .....	79
Tabela 10 - Massa de fibra e resina para o vão de 1,80 m.....	80
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração direta.....	84
Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto .....	87
Tabela 13 - Resultado das forças residuais para CMOD 0,5 a 3,5.....	89
Tabela 14 - Forças registradas experimentalmente .....	93
Tabela 15 - Comparação entre os momentos resistentes estimados e registrados.....	99
Tabela 16 - Dados de entrada para os cálculos.....	113
Tabela 17 - Dados de entrada para os cálculos.....	118
Tabela 18 - Dados de entrada para os cálculos.....	120
Tabela 19 - Dados de entrada para os cálculos.....	124



## LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CARFA	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço
CG	Centro Geométrico
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i>
CSM	<i>Chopped-strand mat</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
LABEST	Laboratório de Estruturas
LEM	Laboratório de Ensaio de Materiais
LNE	Linha Neutra Elástica
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
MEK	<i>Methyl ethyl ketone peroxide in dimethyl phthalate</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PECC	Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
PERFOFRP	Conectores perfurados de polímeros reforçados com fibra de vidro
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PVC	Policloreto de vinila
RTM light	Moldagem por transferência de matriz polimérica e vácuo
SIP	<i>Stay in place form</i>
VARTM	<i>Vacuum-assisted resin transfer molding</i>
	Moldagem por transferência de matriz polimérica assistida por vácuo
V&RI	<i>Vacuum and resin infusion</i>
V&H	<i>Vacuum and heat</i>
UnB	Universidade de Brasília

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Altura do bloco de compressão do concreto
$A_{ef,t}$	Área da seção efetiva da fôrma
$A_m$	Área da seção transversal da mesa/capa do concreto
$A_t$	Área da seção transversal da nervura de concreto
$A_v$	Área trapezoidal resistente do concreto em milímetros quadrados
$b$	Largura unitária da laje
$b_{eq}$	Largura equivalente dos seguimentos da seção transversa da fôrma
$b_n$	Largura entre duas nervuras consecutivas
$b_b$	Largura da parte inferior da nervura
$b_1$	Projeção da distância entre o banzo superior e inferior
$C_E$	Coefficiente de redução ambiental do compósito
CV	Coefficiente de variação
$d_f$	Distância efetiva da fôrma do compósito
$d_{fa}$	Diâmetro da fibra de aço
$d_{fv}$	Distância efetiva da fôrma do compósito no cisalhamento
$e$	Espessura da fôrma do compósito
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_f$	Módulo de elasticidade do compósito
$E_{fiber}$	Módulo de elasticidade da fibra
$EI$	Momento de inércia da laje
$E_m$	módulo de elasticidade da matriz
$F_d$	Ação ponderada
$F_f$	Carga suportada pelas fibras
$F_{Gi,k}$	Ações permanentes
$F_i$	Carga correspondente ao CMOD analisado
$F_L$	Limite de proporcionalidade
$F_m$	Carga suportada pela matriz
$F_{Q\_cons}$	Ações provenientes das cargas variáveis de construção
$F_{Q1,k}$	Ações variáveis
$F_{Qj,k}$	Ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal

$h_g$	Altura da fôrma trapezoidal
$h_{SP}$	Distância entre a face superior do espécime para o início do entalhe
$k_1$	Fator de modificação em relação à resistência do concreto
$k_2$	Fator de modificação em relação ao tipo de envoltória da fôrma
$L_e$	Comprimento ativo de aderência da fôrma
$L_f$	Vão teórico da laje
$I_{ef}$	Momento de inércia efetivo da seção homogeneizada da laje mista
$I_f$	Comprimento de fibra de aço
$I_m$	Momento de inércia da mesa/capa de concreto
$I_t$	Momento de inércia da nervura de concreto
$l_f l_f / d_f$	Fator de forma fibra de aço
$M_{rd,i}$	Momento resistente da estrutura
$M_{sd_{ELU-N}}$	Momento solicitante Estado Limite Último nas condições Normais
$M_{sd_{ELU-C}}$	Momento solicitante Estado Limite Último nas condições Construtivas
$M_{sd_{ELS}}$	Momento solicitante Estado Limite de Serviço
$M_{sd_{ELS-C}}$	Momento solicitante Estado Limite de Serviço na fase Construtivas
$n$	Número de faces da fôrma envoltas no compósito
$N_{cf,I}$	Força de compressão no concreto quando $x \geq t_c$
$N_{cf,II}$	Força de compressão no concreto quando $x < t_c$
$N_{frp}$	Força de tração na fôrma de PRFV
$P$	Carga concentrada aplicada à 1/4 do vão
$q$	Carga uniformemente distribuída
$t_c$	Altura da laje de concreto acima do topo da fôrma
$t_f$	Espessura nominal da fôrma do compósito
$V_c$	Resistência ao cisalhamento do concreto
$V_{frp}$	Resistência ao cisalhamento do compósito
$V_f$	Taxa de fibra
$v_f$	Volume de fibra
$V_{cmax}$	Limite da força cortante
$V_m$	Taxa de matriz
$v_m$	Volume de matriz
$v_{mc}$	Volume do compósito

$V_n$	Resistência nominal ao cisalhamento da estrutura
$V_{sd,ELU-N}$	Resistência ponderada ao cisalhamento para o Estado Limite Último nas condições Normais
$V_{sd,ELU-C}$	Resistência ponderada ao cisalhamento para o Estado Limite Último nas condições Construtivas
$V_{sd,ELS}$	Resistência ponderada ao cisalhamento para o Estado Limite de Serviço
$V_u$	Esforço solicitante último do cisalhamento
$x$	Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra
$y_i$	Distância entre as forças internas resistentes da seção transversal
$y_t$	Distância entre o centro geométrico da nervura de concreto e a seção mais comprimida do elemento
$\gamma_f$	Coefficiente de ponderação das ações para os estados-imites de serviço
$\gamma_{f1}$	Coefficiente que considera a variação das ações
$\gamma_{f2}$	Parcela para a simultaneidade de atuação das ações
$\gamma_{f3}$	Coefficiente que considera erros de avaliação dos efeitos das ações
$\gamma_g$	Coefficiente de redução para ações permanentes
$f_{ck}$	Resistência específica à compressão do concreto
$f_{cd}$	Resistência específica à compressão do concreto ponderada
$f_{fe,d}$	Tensão máxima à tração ponderada do compósito
$f_{fu}^*$	Resistência última à tração do compósito
$f_{R,i}$	Resistência à tração residual do concreto com fibras
$\beta_1$	Taxa de profundidade equivalente para o bloco do retângulo para a linha neutra
$\varepsilon_{cu}$	Deformação última do concreto
$\varepsilon_{fd}$	Deformação de destacamento
$\varepsilon_{fe}$	Deformação efetiva da fôrma do compósito atrelada ao modo de ruptura
$\varepsilon_{fe,v}$	Deformação efetiva da fôrma do compósito atrelada ao cisalhamento
$\varepsilon_{fu}$	Deformação de ruptura de projeto do compósito
$\varepsilon_{fu}^*$	Deformação última de ruptura do compósito
$\kappa_v$	Coefficiente de redução de aderência ao cisalhamento
$\psi_{0j}$	Fator de combinação
$\psi_{2j}$	Fator de redução

$\Psi_f$	Fator de envelopamento da seção
$\phi$	Coefficiente de redução de resistência
$\rho_c$	Massa específica do concreto
$w_{frp}$	Comprimento do reforço de fôrma utilizado
$\alpha$	Ângulo da orientação da fibra da fôrma
$\alpha_E$	Razão modular
$\delta$	Deformação

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificativa .....	4
1.2. Objetivos geral e específicos .....	5
1.3. Estrutura do trabalho.....	5
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>7</b>
2.1. Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) .....	7
2.1.1. Constituição dos materiais compósitos.....	7
2.1.2. Fabricação dos materiais compósitos .....	9
2.2. Concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CARFA).....	12
2.3. Painéis de laje mistos com fôrma permanente de PRFV para fins estruturais	15
2.3.1. Conexão entre concreto e placa de PRFV .....	15
2.3.2. Comportamento estrutural .....	18
2.3.3. Códigos, padronizações e guias de dimensionamento.....	19
2.3.4. Bibliografia consultada ligada diretamente ao tema da pesquisa .....	21
2.4. Considerações finais .....	31
<b>3. Estudo Analítico.....</b>	<b>32</b>
3.1. Cargas consideradas (Q) .....	33
3.1.1. Peso próprio da fôrma de PRFV:.....	33
3.1.2. Peso próprio do concreto: .....	34
3.1.3. Peso próprio de elementos construtivos .....	34
3.1.4. Sobrecarga de construção: .....	34
3.1.5. Sobrecarga de uso: .....	34
3.2. Hipóteses básicas para o dimensionamento.....	34
3.3. Coeficientes de ponderação das ações .....	35
3.3.1. Coeficientes de ponderação para o estado limite último .....	35
3.3.2. Coeficientes de ponderação para o estado limite de serviço .....	36
3.4. Ponderação da resistência do PRFV .....	36
3.4.1. Coeficiente de ponderação devido à exposição ambiental .....	36
3.4.2. Resistência nominal à flexão .....	37

3.4.3.	Resistência nominal à força cortante .....	38
3.5.	Seção transversal geométrica e efetiva .....	38
3.6.	Combinações de ações últimas e de serviço .....	39
3.6.1.	Combinações últimas normais .....	39
3.6.2.	Combinações últimas de construção .....	40
3.6.3.	Combinações de ações de serviço .....	40
3.6.4.	Verificação da laje mista no estado limite último .....	40
3.6.5.	Determinação do momento fletor resistente .....	41
3.6.6.	Determinação da força de cisalhamento resistência .....	43
3.7.	Cálculo no estado limite de serviço .....	45
3.7.1.	Seção homogeneizada .....	45
3.7.2.	Cálculo deflexão e determinação do vão máximo .....	47
3.8.	Fluxograma de cálculo pelo método proposto .....	48
3.9.	Determinação da quantidade necessária de fibras de vidro .....	50
3.10.	Considerações finais .....	50
<b>4.</b>	<b>Programa experimental .....</b>	<b>52</b>
4.1.	Corpos de prova e Parâmetros de Testes .....	53
4.2.	Materiais Constituintes .....	54
4.2.1.	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CARFA) .....	54
4.2.2.	Fôrma permanente trapezoidal de PRFV .....	55
4.3.	Produção das fôrmas permanentes de PRFV .....	56
4.3.1.	Partes constituintes do sistema de infusão .....	56
4.3.2.	Montagem do sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo .....	60
4.3.3.	Produção dos compósitos de PRFV .....	61
4.4.	Caracterização dos compósitos .....	66
4.5.	Produção da Laje Mista de CARFA e PRFV .....	68
4.5.1.	Confecção dos modelos representativos .....	68
4.6.	Caracterização do CARFA .....	69
4.7.	Ensaio de flexão a 4 pontos da laje mista .....	71
4.7.1.	Instrumentação .....	73

4.8.	Considerações finais .....	75
<b>5.</b>	<b>Resultados Experimentais e Discussão .....</b>	<b>76</b>
5.1.	Pré-dimensionamento utilizando o método proposto .....	76
5.1.1.	Ponderação da resistência do PRFV .....	76
5.1.2.	Verificação da laje mista na fase final .....	77
5.1.3.	Determinação da quantidade necessária de fibras de vidro .....	80
5.2.	Propriedades mecânicas dos materiais .....	81
5.2.1.	Polímero reforçado com fibra de vidro .....	81
5.2.2.	Avaliação da qualidade dos compósitos .....	85
5.2.3.	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibra de Aço .....	86
5.3.	Comportamento das lajes mistas .....	89
5.3.1.	Capacidade de carga e modos de ruptura .....	89
5.3.2.	Deslocamentos verticais .....	93
5.3.3.	Deslizamentos horizontais .....	95
5.3.4.	Deformações do concreto e fôrma .....	96
5.3.5.	Efeito da espessura .....	98
5.3.6.	Análise da capacidade de carga .....	98
5.4.	Considerações finais .....	100
<b>6.</b>	<b>Conclusões finais .....</b>	<b>101</b>
6.1.	Produção das fôrmas permanentes de PRFV .....	101
6.2.	Conclusões a respeito do estudo analítico .....	102
6.3.	Resultados obtidos no ensaio de flexão .....	103
6.4.	Sugestões de trabalhos futuros .....	104
<b>7.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>105</b>
<b>8.</b>	<b>Apêndice A – Cálculos analíticos realizados .....</b>	<b>113</b>
8.1.	Cálculo Analítico Ponderado D6F .....	113
8.1.1.	Dados iniciais .....	113
8.1.2.	Ponderação da resistência do PRFV .....	113
8.1.3.	Verificação da laje mista na fase final .....	114
8.2.	Cálculo Analítico Característico D6F .....	118



8.2.1.	Dados iniciais.....	118
8.2.2.	Ponderação da resistência do PRFV .....	118
8.2.3.	Verificação da laje mista na fase final .....	119
8.3.	Cálculo Analítico Ponderado D8F .....	119
8.3.1.	Dados iniciais.....	119
8.3.2.	Ponderação da resistência do PRFV .....	120
8.3.3.	Verificação da laje mista na fase final .....	121
8.4.	Cálculo Analítico Característico D8F .....	124
8.4.1.	Dados iniciais.....	124
8.4.2.	Ponderação da resistência do PRFV .....	125
8.4.3.	Verificação da laje mista na fase final .....	125

## 1. INTRODUÇÃO

As estruturas convencionais geralmente são construídas utilizando um sistema de cimbramento composto por fôrmas provisórias e escoramentos, feitos de aço ou madeira. Esses elementos são responsáveis por suportar as cargas de construção durante o processo de montagem das armaduras e concretagem dos elementos. Eles são removidos somente quando o concreto atinge resistência suficiente para suportar seu próprio peso e as cargas de trabalho. Em casos de edifícios de múltiplos pavimentos, as lajes são reescoradas, evitando a sobrecarga oriunda dos esforços de concretagens das estruturas posteriores, criando um sistema decrescente de escoramento entre os andares.

Apesar de ser um sistema consolidado, essa sequência de montagem precisa ser levada em consideração no processo construtivo por dificultar o avanço de cronograma de sistemas específicos, como por exemplo as vedações externas e internas, bem como a execução dos revestimentos. De acordo com a ABNT NBR 15.696 (2009), deve-se adotar um ciclo mínimo de remanejamento ou remoção de escoramentos de 14 dias.

Por essa razão, ao longo dos anos, a indústria da construção civil vem desenvolvendo novos sistemas e materiais com o objetivo de otimizar a industrialização das estruturas. Essas inovações visam não apenas a agilidade do processo, mas também durabilidade, vida útil e eficiência na produção dos elementos estruturais e seus componentes.

Existem sistemas alternativos ao cimbramento convencional que dão celeridade à construção, e um deles é o uso de fôrmas permanentes. Essas fôrmas não são retiradas após a concretagem e, quando estruturais, também são partes resistentes da estrutura. Nesse sistema, a fôrma não só suporta as cargas da construção com pouco ou nenhum escoramento, mas também resiste simultaneamente às tensões de tração quando este ocorre na parte inferior da estrutura. Enquanto isso, o concreto resiste à compressão na área comprimida da seção transversal, otimizando o uso de cada material.

Um dos modelos mais conhecidos deste tipo de estrutura mista é a fôrma de aço trapezoidal denominada *steel deck* que surgiu na década de 40, mas só foi introduzido no mercado brasileiro a partir dos anos 90 (Sieg, 2015). Apesar de serem amplamente utilizadas, pesquisas revelam fissuras por fadiga nas soldas e nos detalhes geométricos dos *steel decks*, podendo citar inclusive a recuperação estrutural realizada na laje da Ponte Rio-Niterói entre os anos 2000 e 2001 (Battista *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2019). Apesar de receberem um tratamento de galvanização, estas fôrmas ficam sujeitas à corrosão devido à formação de pilhas galvânicas

ou até mesmo devido fissuras ocasionadas pela fadiga da estrutura (Jeong *et al.*, 2013; Jiand e Wang, 2023).

Não há dúvidas que a utilização das fôrmas permanentes aumenta a produtividade durante a construção. No entanto, por estarem diretamente expostas ao meio ambiente, esse tipo de sistema está mais sujeito à degradação devido às intempéries, sendo a escolha do material de sua composição um fator significativo para a durabilidade da estrutura.

Nesse contexto, os Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV) têm se destacado como uma alternativa ao uso fôrmas permanentes metálicas. Essa substituição é motivada pelas propriedades físicas e químicas do material. Segundo Zoghi (2014), a utilização dos PRFVs apresenta vantagens significativas, como a resistência à corrosão, baixa densidade, boa resistência à fadiga e facilidade de manuseio.

Dessa forma, com o objetivo de otimizar os elementos estruturais e considerar o comportamento distinto de cada material, pesquisadores têm explorado a combinação da alta resistência à compressão do concreto com a alta resistência à tração dos PRFVs, unindo o bom custo-benefício desse material e propondo o uso de lajes mistas com diferentes geometrias para as fôrmas permanentes (Kossakowski e Wcislik, 2022; Nelson *et al.*, 2014; Qureshi, 2023; Zou *et al.*, 2021). No entanto, ao estudar as lajes compósitas com PRFV, é importante levar em consideração também suas desvantagens, como o baixo módulo de elasticidade, o comportamento linear elástico até a ruptura, a heterogeneidade e a anisotropia. Dessa forma, busca-se não apenas caracterizar o comportamento da estrutura mista, mas também aumentar a rigidez do sistema ao mesmo tempo em que se reduz o peso próprio.

Na Figura 1 apresentam-se algumas configurações já propostas para lajes mistas compostas por PRFV e concreto. Dentre elas, lajes reforçadas com fôrmas retas, estudadas por Honickman (2008); fôrmas retas enrijecidas com barras em “I” ou “T”, sendo perfuradas ou não (Boules *et al.*, 2023; Goyal *et al.*, 2022; Nelson *et al.*, 2013; Oliva *et al.*, 2007; Zuo *et al.*, 2018); fôrmas retas com enrijecedores em “Y” e quadradas vazadas (Pournasiri; Pham; Hao, 2022); perfis compósitos e capas de concreto, como os utilizados no trabalho de Santos Neto (2006) e Gonilha, Correia e Branco (2014); placas corrugadas com seções fechadas, enrijecidas e seções vazadas (Fam; Nelson, 2012; He *et al.*, 2012; Siwowski; Rajchel; Wlasak, 2021); e até mesmo modelos de painéis como o *EasyFlor*, projeto de pesquisa da Universidade do Minho (Mastali; Barros; Valente, 2014; Oliveira, 2018).

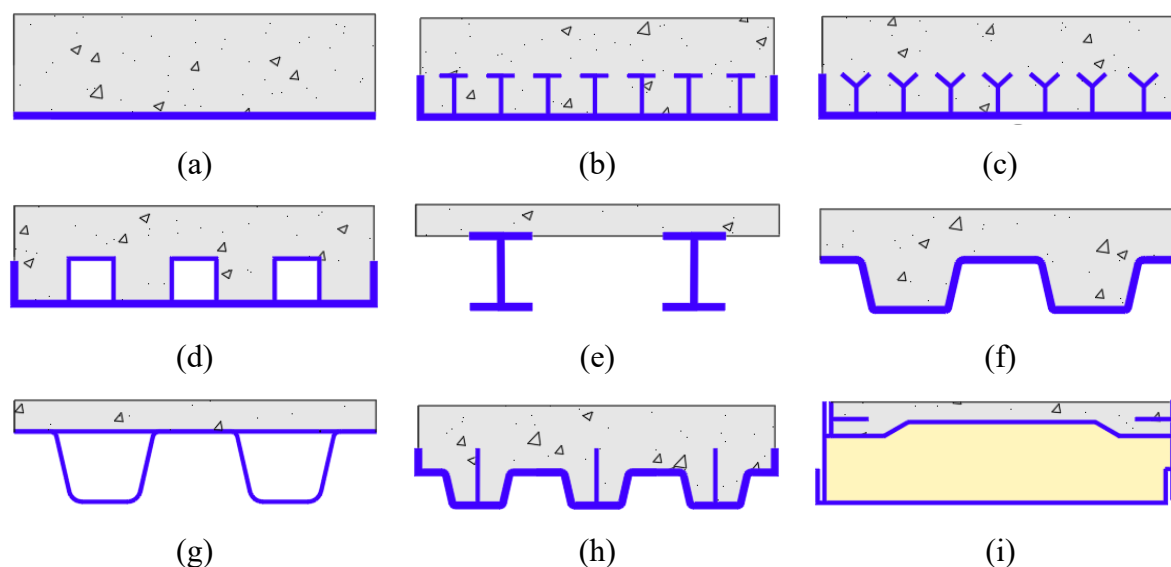


Figura 1 – Exemplos de seções transversais de lajes mistas de PRFV e concreto. (a) fôrma reta com concreto (Honickman, 2008); (b) fôrma com enrijecedores tipo “t” (Boules *et al.*, 2023; Goyal *et al.*, 2022; Nelson *et al.*, 2013; Oliva *et al.*, 2007; Zuo *et al.*, 2018); (c) fôrma com enrijecedores tipo “y” (Pournasiri; Pham; Hao, 2022); (d) fôrma com seção quadrada vazada (Pournasiri; Pham; Hao, 2022); (e) perfil “i” e concreto (Santos Neto, 2006); (f) trapezoidal (Fam; Nelson, 2012); (g) trapezoidal com seção vazada (Siwowski; Rajchel; Wlasak, 2021); (h) trapezoidal com enrijecedores (He *et al.*, 2012); (i) painel com pur e prfv – *easyflor* (Mastali; Barros; Valente, 2014; Oliveira, 2018).

Nas lajes mistas apresentadas na Figura 1, os autores utilizaram barras de aço e de PRFV como reforço superior para controle de fissuras que podem surgir devido ao efeito da retração do concreto ou das variações de temperatura. Uma possível alternativa ao uso das armaduras convencionais e que pode promover uma maior industrialização e rapidez de construção é o uso do concreto com fibras, sendo abordado apenas por Santos Neto (2006) e no desenvolvimento do *EasyFloor* (Mastali; Barros; Valente, 2014; Oliveira, 2018). No entanto, não se tem conhecimento de estudos que tenham unido a geometria trapezoidal semelhante ao *steel deck* em fôrmas permanentes trapezoidais de PRFV e o concreto com fibras para a produção de lajes mistas.

Este estudo se diferencia da literatura existente ao propor e avaliar experimentalmente o comportamento à flexão de uma laje mista unidirecional inovadora, constituída por uma fôrma permanente de PRFV e Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CARFA), conforme Figura 2. A fôrma permanente proposta possui seção transversal trapezoidal e foi produzida fazendo-se uso de infusão à vácuo. Já o CARFA foi proposto com o intuito de dispensar a necessidade de adensamento do concreto e o uso de barras adicionais na superfície superior da laje. Também pretende-se obter uma resposta mais dúctil para o elemento estrutural utilizando-se o concreto reforçado com fibras.



Figura 2 - Esquema representativo da laje mista proposta, composta por fôrma permanente de PRFV e CARFA.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa é fundamentada na crescente utilização de estruturas mistas que empregam materiais compósitos de PRFV. No entanto, é importante destacar que ainda existem lacunas e desafios no que diz respeito ao dimensionamento e fabricação desses elementos estruturais. A ausência de normas técnicas e padrões de fabricação estabelecidos torna indispensável a realização de estudos abrangentes para compreender a capacidade de suporte, os modos de falha e o comportamento dessas estruturas diante de exposição a intempéries, fadiga e outros fatores adversos. Portanto, esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento e práticas adequadas na aplicação desses materiais inovadores na construção civil, propondo um novo sistema de lajes mistas e gerando dados experimentais escassos na literatura.

Este trabalho é uma pesquisa do grupo *Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures* (CMRSS), vinculado à Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC) da Universidade de Brasília (UnB). O trabalho está enquadrado na linha de pesquisa Análise Experimental de Estruturas, da área de concentração de Estruturas. Outras investigações foram realizadas anteriormente no âmbito do CMRSS com o intuito de produzir novos elementos de construção com função estrutural e em PRFV. No entanto, estas pesquisas sempre se limitaram a produzir placas de PRFV planas e de pequenas dimensões, por meio do processo de infusão de resina com auxílio do vácuo, podendo-se citar o trabalho de Silva (2020), no qual foram produzidos conectores de cisalhamentos perfurados de PRFV (PERFOFRP) medindo  $200 \times 150 \times 2,3$  mm. O presente trabalho teve o desafio adicional de ser o primeiro do grupo de pesquisa a produzir elementos de grandes dimensões e com geometrias não-planas.

## 1.2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

A dissertação tem como objetivo geral propor e avaliar experimentalmente o comportamento à flexão de um sistema inovador de lajes mistas para uso residencial e comercial que utiliza fôrma permanente de PRFV e CARFA.

Além disso, a dissertação apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Propor um modelo analítico para dimensionamento à flexão de lajes mistas com fôrmas permanentes trapezoidais de PRFV;
- Investigar experimentalmente o impacto da variação do teor de fibras unidirecionais da fôrma permanente no seu comportamento à flexão;
- Caracterizar experimentalmente o comportamento à flexão da laje mista de CARFA e PRFV para determinar a sua ductilidade, capacidade resistente e modos de ruptura e
- Avaliar experimentalmente a possibilidade de o uso do CARFA substituir a armadura mínima no sistema de lajes mistas propostos.

## 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho foi composta por oito etapas principais, divididas em sete capítulos, que abrangem desde a introdução até as referências bibliográficas. Além disso, há um apêndice contendo os resultados obtidos na planilha de cálculo utilizada no estudo analítico.

Dessa forma, o Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica realizada para embasar e situar este trabalho. O qual são abordados conceitos sobre materiais compósitos, métodos de produção, contextualização de guias e a aplicação desses materiais em lajes com fôrmas permanentes.

O Capítulo 3 aborda o estudo analítico deste sistema estrutural, apresentando uma nova proposta de dimensionamento inspirada no dimensionamento de *steel decks* para flexão, juntamente com considerações específicas para os PRFV.

O Capítulo 4 descreve o programa experimental realizado, detalhando a metodologia utilizada, as principais etapas do trabalho experimental, bem como os procedimentos de produção dos compósitos e execução dos ensaios.

Os resultados obtidos a partir do programa experimental são apresentados no Capítulo 5. São discutidos os principais dados coletados, comparado com resultados obtidos em outras pesquisas e com o resultado do estudo analítico.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, o encerramento desta dissertação é realizado listando as referências bibliográficas utilizadas, seguidas do Apêndice A, o qual estão detalhados os cálculos realizados por meio do modelo analítico proposto.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

Os polímeros reforçados com fibras consistem em uma combinação de pelo menos dois materiais distintos com propriedades termomecânicas complementares. Essa combinação resulta em um material compósito que possui propriedades superiores às de seus componentes individuais (Zoghi, 2014).

Na construção civil, os compósitos de polímeros reforçados com fibra estão se tornando cada vez mais populares devido às suas características físicas e químicas vantajosas. Entre eles, os compósitos reforçados com fibra de vidro são especialmente reconhecidos por oferecerem um ótimo custo-benefício. Segundo Mazumdar (2002), esses materiais compósitos têm o potencial de substituir amplamente o uso de aço e alumínio, muitas vezes superando o desempenho desses materiais. A substituição de componentes de aço pode resultar em uma melhoria de 60 a 80% do peso da estrutura, enquanto no caso do alumínio, a redução pode ser de 20 a 50%. Ascione *et al.* (2016) destacam uma série de benefícios associados ao uso de PRFV na construção civil, tais como: melhores oportunidades de pré-fabricação e otimização de transporte, montagem rápida, redução da necessidade de mão de obra, alta durabilidade e baixa necessidade de manutenção, peso próprio reduzido (sendo pelo menos 33% do peso de estruturas convencionais de concreto), bom desempenho à fadiga, transparência eletromagnética e grande adaptabilidade para aplicação em diversos acessórios do sistema, como corrimão, parapeitos, passarelas e outros.

Para explorar o potencial desses materiais compósitos, é fundamental ter um entendimento claro de sua composição, processo de fabricação e principais características. Esses tópicos que serão abordados a seguir.

#### 2.1.1. Constituição dos materiais compósitos

Um material compósito é constituído principalmente por duas fases: a fase dispersa (também chamada de descontínua) e fase denominada matriz, que funciona como uma conexão da fase dispersa. As propriedades dos compósitos dependem das fases constituintes como a forma e tamanho da sua fase dispersa, distribuição e orientação das partículas, proporção dos materiais e outros (Callister e Rethwisch, 2016).

A matriz pode ser classificada em natural e sintética e é fundamental para o desempenho da estrutura compósita, cumprindo diversas funções como unir as camadas de reforço, transferir



esforços, funcionar como uma barreira contra intempéries, influenciar na capacidade de resistência ao cisalhamento e à compressão (Zoghi, 2014). A matriz isola a fase dispersa para que cada uma tenha sua ação individual, fazendo com que a propagação de uma fissura diminua ou até mesmo cesse. Em virtude disso, a matriz também está fortemente ligada com o modo de ruptura de uma estrutura compósita, assim como sua compatibilidade com a fase dispersa (Mazumdar, 2002).

As matrizes podem ser compostas por diferentes materiais, incluindo metais, polímeros e cerâmicas. Neste estudo será utilizada a matriz polimérica, a qual de acordo com Chawla (2012), além de ser mais barata e fácil de processar quando comparados aos metais e cerâmicas, são quimicamente mais resistentes que os metais, porém possuem baixa resistência e módulo de elasticidade.

Os polímeros podem ser classificados em termofixos ou termoplásticos, de acordo com seu comportamento ao calor. Quando aquecidos, os polímeros termofixos (como epóxi, poliéster, resinas fenólicas e outros) sofrem mudanças permanentes, enquanto os termoplásticos (como polietileno, policarbonato, nylon e outros) sofrem apenas mudança física temporárias. A matriz termofixa possui melhores propriedades mecânicas, resistência química, estabilidade térmica e durabilidade comparada à termoplástica e por isso é largamente utilizada na construção civil. No entanto, ela também apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de grandes períodos de cura, a dificuldade em ser recicláveis e o comportamento frágil (Zoghi, 2014).

Os materiais compósitos podem ter diferentes denominações de acordo com sua fase dispersa, podendo ser classificado como compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e nanocompósitos. Tecnicamente os compósitos mais importantes são os reforçados com fibras, que possuem como objetivo de projeto a alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso próprio (Callister e Rethwisch, 2016).

As fibras são responsáveis por conferir entre 70 a 90% da resistência mecânica dos materiais compósitos, além de serem responsáveis pela rigidez, resistência, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais (Mazumdar, 2002). As fibras podem ser naturais ou sintéticas, no entanto as mais utilizadas comercialmente são as fibras sintéticas de vidro, carbono e aramida (ACI 440.R, 2007). As propriedades dos materiais compósitos são influenciadas não apenas pelo tipo de fibra em sua composição, mas também pelo comprimento, orientação, distribuição e concentração dos mesmos. Em geral, as fibras são classificadas em contínuas e alinhadas, descontínuas e alinhadas, e curtas e aleatórias.

A fibra de vidro é a fibra mais utilizada na construção civil, seja pelo seu custo-benefício ou por suas propriedades resistentes. Sua composição principal é areia, o calcário, o óxido de alumínio e o óxido de magnésio. Ao utilizá-las para a produção de compósitos de PRFV, quesitos como teor de fibras em relação ao peso total, orientação da aplicação das fibras, o polímero da matriz e o sistema de cura utilizado precisam ser levados em consideração para que sejam mantidas as propriedades mecânicas dos materiais (Ortenzi Júnior, 2007).

### **2.1.2. Fabricação dos materiais compósitos**

A eficácia na produção de materiais compósitos é diretamente influenciada pela combinação da matriz e fibra utilizada, pois cada material possui propriedades físicas diferentes como ponto de fusão, rigidez, resistência a tração e módulo de elasticidade (Rajak *et al.*, 2019).

De acordo com Zoghi (2014), as formas de produção de polímeros reforçados com fibras podem ser divididas entre três categorias: processo manual, semiautomatizado e automatizado. Essas formas de produção, segundo Marinucci (2019), também podem ser divididas entre processos de molde aberto e processos de molde fechados. São exemplos de processos de fabricação: laminação por contato, laminação por projeção, enrolamento filamentar, infusão, moldagem por prensagem, moldagem por transferência de matriz, moldagem a vácuo e processo de infusão de resina com auxílio do vácuo. Neste contexto, serão abordados os processos de produção mais utilizados pela bibliografia de base na aplicação de polímeros para fins estruturais, sendo estes a laminação manual, pultrusão e produção a vácuo.

#### **2.1.2.1. Laminação manual / por contato (hand lay-up):**

O processo de laminação manual é o mais difundido e mais utilizado mundialmente para a fabricação de peças e partes que não exijam grande volume de produção. Suas principais vantagens são o baixo custo de mão de obra, baixo investimento em moldes e baixo investimento em ferramentas. Em contrapartida, como desvantagens desse método pode-se citar o maior tempo gasto para preparar o material e o maior número de pessoas para realizar a compactação das camadas aplicadas, sem contar da dependência da habilidade da mão de obra (Ortenzi Júnior, 2007). O método consiste em aplicar manualmente a resina direto na fibra utilizando um molde negativo, adicionando camada por camada, conforme pode ser visto na Figura 3.

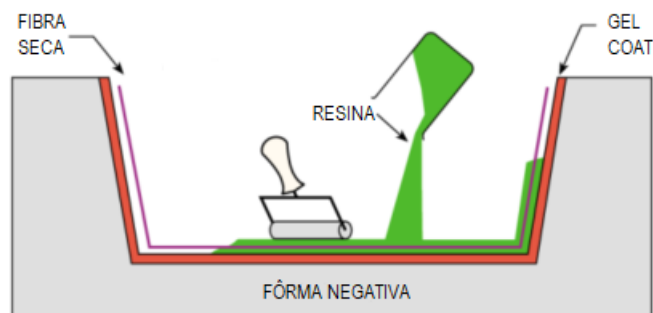


Figura 3 - Laminação manual. Fonte: Qureshi, 2023.

#### 2.1.2.2. Pultrusão:

A tecnologia de pultrusão foi desenvolvida no início dos anos 1950, mas com pouca expansão até os anos de 1980 devido ao desconhecimento dos produtos fabricados (Marinucci, 2019). O ACI 440.R (2007) o define como um processo de molde contínuo que combina reforço de fibras e resinas termofixas, sendo utilizada nos processos de fabricação de compósitos com seção transversal constante, correspondendo à um processo altamente automatizado.

Na fabricação por pultrusão as fibras utilizadas são de filamentos diretos, sendo os rolos acomodados em prateleiras e a quantidade utilizada varia de acordo com a geometria do perfil. Os fios passam por uma bandeja contendo o polímero já catalisado e são reunidos posteriormente por meio de uma ferramenta de conformação existente na câmara de cura (Figura 4). Após este trajeto, os perfis são cortados de acordo com as necessidades comerciais (Ortenzi Júnior, 2007).

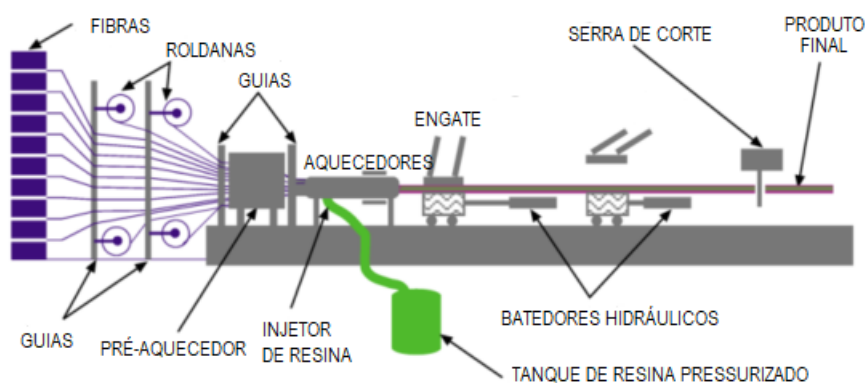


Figura 4 - Sistema de pultrusão. Fonte: Qureshi, 2023.

#### 2.1.2.3. Produção com pressão negativa / vácuo:

Diversos tipos de produção de compósitos utilizam o vácuo como forma de otimização, tanto nos processos com moldes abertos ou moldes fechados. Dentre eles podemos citar a

Moldagem por transferência de matriz polimérica, moldagem à vácuo e moldagem por transferência de matriz polimérica assistida por vácuo (VARTM).

### *I. Moldagem por transferência de matriz polimérica e vácuo (RTM light):*

É um processo de molde fechado sob pressão negativa. A resina líquida é injetada por equipamento dosador por meio de uma bomba. Dentre as vantagens da utilização do RTM pode-se citar os modelos complexos que podem ser obtidos com este processo, o alto nível de automação que pode ser alcançado e a redução de emissões de estireno por se tratar de um molde fechado (Chawla, 2012). Segundo Jose *et al.* (2012), esse método tem o potencial de virar um processo dominante de baixo custo para a produção de produtos de alto desempenho.

### *II. Moldagem a vácuo:*

É um processo similar ao RTM *light*, porém não contém a injeção da matriz por equipamento dosador (Figura 5). Este processo exige baixo investimento em equipamentos, sendo necessário apenas moldes inferior e superior, bombas de vácuo e dispositivo para retenção do excesso de matriz para a proteção da bomba de vácuo (Marinucci, 2019).

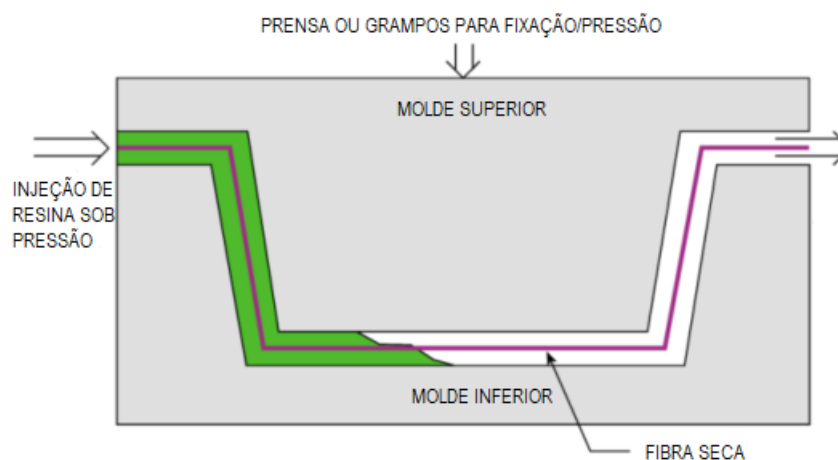


Figura 5 - Moldagem à vácuo. Fonte: Qureshi, 2023.

### *III. Laminação à vácuo:*

A laminação à vácuo é um processo similar à laminação manual, todavia é utilizada a bolsa de vácuo e um molde negativo para remover o excesso de resina oriundo do processo manual por meio de uma camada absorvente, não sendo injetada resina no sistema, conforme Figura 6. A pressão negativa gerada pelo vácuo auxilia na compactação das camadas e remove o excesso de resina, devendo estar atendo ao tempo de trabalho da matriz escolhida.

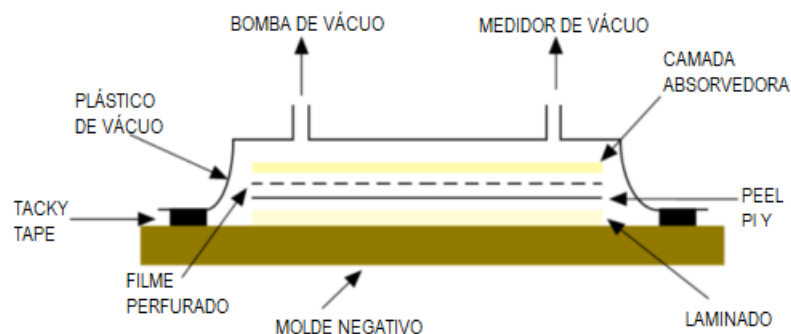


Figura 6 - Laminação à vácuo. Fonte: Qureshi, 2023.

#### IV. Infusão de resina com auxílio do vácuo (“vacuum-assisted resin transfer molding” - VARTM):

É uma técnica aplicada na fabricação de peças de grande porte que utiliza a fibra seca envolta de uma bolsa de vácuo, conforme Figura 7. Nesse processo, a fibra seca é colocada em um molde “macho”, responsável pela geometria da peça, enquanto uma camada drenante é posicionada entre a fibra e o plástico para vácuo, com a função de facilitar o escoamento da resina e a saturação das fibras (ACI 440.R, 2007). A infusão de resina com auxílio do vácuo é adequada para produção em pequena escala, garantindo boa qualidade, boas propriedades mecânicas e baixo volume de vazios aos compósitos por ela fabricados. Essa técnica possibilita economia de resina e reduz quase totalmente a emissão de produtos orgânicos voláteis no ambiente de trabalho. Entretanto, por ser molde aberto, essa técnica permite acabamento em apenas uma das faces (Marinucci, 2019).

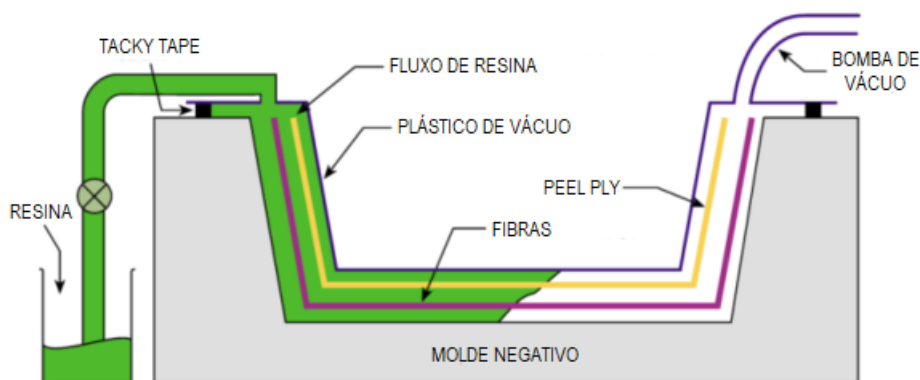


Figura 7 - Sistema de infusão com auxílio de vácuo. Fonte: Qureshi, 2023.

## 2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO (CARFA)

Com o avanço da tecnologia na construção civil, o concreto convencional tem evoluído e ganhado novas características. O mercado atual demanda frequentemente concretos com alto

desempenho, alta capacidade de adensamento, coloridos e até mesmo translúcidos. Para atender a essas demandas, surgiram soluções como o concreto autoadensável e o concreto com fibras.

Quando essas soluções são combinadas, o resultado é o concreto autoadensável reforçado com fibras, um componente com grande resistência, boa trabalhabilidade e excelente desempenho. Esse tipo de concreto é capaz de atender aos mais exigentes parâmetros e requisitos das novas construções.

Segundo Gomes e Barros (2009), o concreto autoadensável foi desenvolvido no Japão em 1988 com a finalidade de criar estruturas mais duráveis, econômicas e produtivas, eliminando a necessidade de adensamento mecânico do concreto. Essa tecnologia proporcionou uma maior qualidade do concreto, reduzindo o tempo e os custos de produção e gerando, ao longo do tempo, um interesse mundial no material.

Por outro lado, o uso de reforços fibrosos em matrizes cimentícias tem sido amplamente estudado desde a década de sessenta no meio acadêmico, visando superar a natureza frágil do concreto ao fornecer características especiais como melhor desempenho à retração, controle de abertura e propagação de fissuras (Pereira, 2017). As fibras alteram o comportamento mecânico do concreto após a fissuração da matriz, aumentando a sua capacidade de absorção de energia e diminuindo o nível de fragilidade do material (ABNT NBR 16.935, 2021).

As fibras incorporadas no concreto são curtas e descontínuas, podendo ser fibras de alto módulo de elasticidade e baixo módulo de elasticidade. As fibras de alto módulo de elasticidade são utilizadas como reforço do concreto, também chamadas de macro-fibras, podendo ser de aço ou poliméricas. As fibras de baixo módulo de elasticidade não possuem um foco voltado para o reforço estrutural, sendo frequentemente aplicados para controle de retração. Como exemplo de fibras de baixo módulo pode-se citar as microfibras poliméricas (Figueiredo, 2011).

Quanto a origem, as fibras podem ser naturais ou industrializadas, tais como sisal, polipropileno, côco, juta e aço. No entanto, a fibra de aço é a mais comum devido à excelente compatibilidade com o concreto, facilidade de uso e aumento da tenacidade e resistência a cargas estáticas e dinâmicas. Isso ocorre devido à relação entre o alto módulo de elasticidade da fibra de aço e o da matriz, facilitando a transferência de cargas após a fissuração do concreto (Velasco, 2008). Os concretos reforçados com esses materiais possuem uma matriz cimentícia, que pode ser concreto, argamassa ou pasta e em sua composição também podem ser incluídos materiais pozolânicos e aditivos químicos (Pereira, 2017).

Pajak e Ponikiewski (2013) analisaram o comportamento à flexão do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço retas e com ganchos nas extremidades com frações

volumétricas de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Os resultados indicaram que o tipo de fibra de aço tem um efeito significativo nos parâmetros após atingir o pico de resistência, sendo mais eficazes e com maior deflexão no carregamento máximo as fibras com ganchos sem sua extremidade.

Em sua pesquisa, Canalli (2010) verificou que as fibras atuam como uma ponte de transferência de tensões diminuindo a velocidade de propagação das fissuras no material tendo assim um comportamento dúctil em toda a peça. De acordo com Velasco (2008), o uso de fibras de aço como reforço acarretou incrementos máximos de 31% da resistência a compressão, 72% da capacidade de deformação e 164% na resistência à tração na flexão de suas amostras ensaiadas.

Cardoso (2020) analisou o efeito de adição de fibras de aço e polipropileno em diferentes teores em 14 modelos de traço de concretos autoadensáveis. Ao adicionar as fibras no traço de concreto o autor constatou a diminuição da compacidade nos dois tipos de fibra, todavia a diminuição utilizando a fibra sintética de polipropileno foi muito menos significativa, podendo ser explicado pela característica flexível da fibra, se adequando melhor aos agregados. Quando comparados os tipos e teores de fibra em concretos de mesma resistência o autor observou que a fibra do tipo ST-33/60 obteve melhores resultados. Tal comportamento pode ser explicado devido a maior quantidade de fibras de aço por grama e o elevado fator de forma do modelo citado.

Nguyen, Bui, T. e Bui, Q. (2022) realizaram experimentos para identificar o comportamento à compressão e tração de concreto reforçado com fibras de aço com adição variando entre 25 a 100 kg/m<sup>3</sup>. Os autores constataram que a influência da incorporação da fibra de aço é limitada e chega a um ponto em que a ruptura não se dá pelo escoamento das fibras e sim pela ruptura de ancoragem entre as fibras e o concreto. Entretanto, com a adição destes componentes entre 25 e 100 kg/m<sup>3</sup> foi possível melhorar o comportamento do concreto à tração em 8 a 97%, respectivamente, quando comparado ao concreto de referência. Avaliando o desempenho com base no *Eurocode 2* os autores afirmaram que uma laje reforçada apenas com fibras de aço pode atender aos critérios normativos para a utilização em edificações residenciais com sobrecargas entre 5 a 10 kN/m<sup>2</sup>.

Shimosaka (2017) analisou em sua pesquisa o comportamento de concreto autoadensável em seu estado plástico e endurecido com a incorporação de diferentes fibras de aço (corrugada, ancorada e reta) e diferentes teores de substituição variando entre 0,4 a 1,5% em volume. O autor atestou que ao incorporar as fibras de aço, independentemente do tipo de fibra, a fluidez e habilidade passante do concreto no estado fresco é afetada na proporção direta

do aumento de fibras. De acordo com o autor, ao analisar as propriedades no estado endurecido foi possível constatar que as propriedades mecânicas tiveram alterações dependendo do teor de fibras incorporados, sem variações significativas em relação ao tipo de fibra de aço. Dentre as propriedades mecânicas a resistência a compressão foi a característica menos alterada ao incorporar fibras, já a resistência à tração obteve um ganho elevado de na incorporação, chegando aos 87,85%. Em concordância aos dados analisados, o autor afirma que é viável incorporar fibras de aço em concreto autoadensáveis para aumentar sua resistência à tração sem que perca características de auto adensabilidade.

Segundo Pereira (2017), as fibras de aço são mais vantajosas que a tela soldada em frações volumétricas menores que 1%, pois auxiliam na redução de fissuração devido a retração, distribuem de maneira mais eficiente as cargas devido a sua configuração aleatória, reduzem diretamente o custo com mão de obra e estão menos sujeitas à corrosão do que armaduras longitudinais.

Além do aumento da resistência à tração e ductibilidade, de acordo com Ahmad *et al.* (2020), parâmetros como absorção de água, permeabilidade e resistência à ácidos são aprimorados com a adição de fibras de aço no concreto devido à sua interceptação de fissuras, restringindo a formação de fissuras iniciais, conseqüentemente aumentando a durabilidade do concreto.

### 2.3. PAINÉIS DE LAJE MISTOS COM FÔRMA PERMANENTE DE PRFV PARA FINS ESTRUTURAIIS

#### 2.3.1. Conexão entre concreto e placa de PRFV

Uma boa conexão entre o concreto utilizado e a placa do polímero reforçado com fibras é necessária para garantir que a estrutura se comporte utilizando as características mais desejáveis em cada material: a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do PRFV. De acordo com Zuo *et al.* (2021) devem haver medidas para assegurar essa conexão de interface entre o concreto e PRFV de forma que os materiais desenvolvam uma ação conjunta. Essa conexão, segundo o autor, pode ser física ou química, sendo elas: ligação adesiva, intertravamento mecânico, revestimento de areia, conexões de cisalhamento, buchas, pinos ou parafusos e conectores perfurados de PRFV (PERFOFRP). A rigidez longitudinal do conector de cisalhamento afeta a rigidez da seção compósita e define seu grau de ação compósita (Lameiras *et al.*, 2018a).



Com base nos dados apresentados, faz-se necessário entender o comportamento dos diferentes tipos de conexão que podem ser utilizados na fôrma permanente de PRFV para garantir a ação conjunta da estrutura. Com intuito de determinar a melhor conexão para os corpos de prova em estudo, serão abordados os resultados de pesquisas experimentais existentes com três tipos de conectores: químicos de ligação adesiva, físicos de cisalhamento e físicos de revestimento de areia.

#### 2.3.1.1. Conectores químicos de ligação adesiva

A conexão química entre a superfície do PRFV e concreto autoadensável reforçado com fibra de aço levando em consideração a influência do tipo de adesivo, tipo de tratamento na superfície e o comportamento após a exposição ambiental de umidade de temperatura foi estudada por Sena-Cruz *et al.*, (2020). Por meio das análises foi possível constatar que o tipo de adesivo possui uma significância maior que o tratamento na superfície do polímero. Avaliando a exposição ambiental os autores constataram que o tipo de exposição afeta a resistência de aderência apesar do tempo de exposição ter pouca influência neste dano. Todavia, apesar de afetar parcialmente a resistência de aderência, este dano não foi significativo para modificar o modo de ruptura da estrutura.

Nelson, Eldridge e Fam (2013) analisaram o acréscimo de resistência última e rigidez na laje mista de PRFV e concreto devido a utilização de adesivo como conexão química, encontrando um aumento de resistência de 30% e um aumento de rigidez de 73% quando comparado ao corpo de prova sem adesivo.

#### 2.3.1.2. Conectores Físicos de Cisalhamento

Ao analisar conectores físicos do tipo liso, perfurado e indentado em PRFV em elementos de argamassa de ultra elevada ductilidade, Machado (2015) constatou que o comportamento de que os corpos de prova apresentavam rigidez semelhantes até ser atingida a força máxima e que na fase de comportamento dúctil com deformação os conectores perfurados com espessura de 6 mm obtiveram os melhores registros de carga máxima e ductilidade. Comparados aos conectores indentados os perfurados obtiveram uma carga máxima 4,6% maior e comparados aos conectores lisos esse valor foi de 12,2%.

O comportamento do conector perfurado de PRFV foi analisado em um estudo composto por duas partes por Lameiras *et al.* (2018a, 2018b) por meio de testes de arrancamento (*pull-out*) analisando o tipo de ruptura e correlacionando com a geometria, tipos de fibra e tipos de concreto utilizados. Por meio dos ensaios os autores constataram a

importância da fricção no comportamento mecânico dos conectores de PRFV e que a capacidade de carga dos conectores está limitada pela distância do furo e a parte superior do corpo de prova independente do compósito utilizado.

Silva (2020) avaliou o emprego de conectores perfurados de PRFV confeccionados com sistema à vácuo e analisou que cada diâmetro possui um espaçamento característico para a otimização do comportamento mecânico do conector, para o qual as respostas das conexões apresentaram-se rígidas até a força máxima da conexão e após esse ponto o comportamento apresentou-se aleatório com alguns conectores apresentando escoamento e outros com decaimento da força. O tipo de conexão também influenciou na resistência de forma que as conexões perfuradas apresentaram um ganho de resistência variando entre -6% a 45%, menores deslocamentos relativos e maiores níveis de rigidez.

### 2.3.1.3. Conectores Físicos de Revestimento de Areia

De acordo com Cho K., *et al.* (2006), o revestimento aderido de areia é geralmente aplicado para assegurar a ação compósita do painel de PRF e concreto, ao invés da aplicação de epóxi para a junta química, que é extensivamente utilizada para o reforço de estruturas deterioradas. Os autores pesquisaram o comportamento de ligação de revestimento de areia e o compararam com a ligação apenas com epóxi, por meio de ensaios de cisalhamento puro. Os resultados indicaram que os corpos de prova com revestimento de areia apresentaram maior resistência, com uma tensão de aderência média variando em até 0,960 MPa, enquanto a aderência com epóxi apresentou uma resistência inferior, com 0,843 MPa e maior desvio padrão. Com base nesses resultados, os autores afirmam que a promoção de aderência por meio da aplicação de uma camada de areia é preferível em comparação com a aplicação apenas de epóxi, devendo-se utilizar esse último apenas quando a camada de areia for impraticável.

Boules, Fam e Genikomsou (2021) investigaram comportamento de lajes de concreto com fôrma aderida integradas com vigas I, ambas de PRFV, com ligação adesiva e com revestimento de cascalho. De acordo com os resultados, a superfície revestida de agregados não causou escorregamento do concreto, levando à falha do elemento por cisalhamento diagonal, como parte da conclusão da pesquisa os autores recomendam que o tratamento com revestimento de agregados nas fôrmas de PRFV sejam mais adequados na prática.

Cho J., *et al.* (2010) conduziram um estudo sobre a aderência de interface revestida com areia entre a fôrma de PRFV e o concreto, utilizando o tamanho e a densidade de distribuição dos grãos como parâmetros principais. Para avaliar o comportamento, uma série de testes de cisalhamento e tração foram realizados nos corpos de prova. Os resultados mostraram que a

resistência ao cisalhamento aumentou significativamente com uso de agregados de menores dimensões e com uma maior distribuição de densidade. Esses dados sugerem que o uso de agregados de tamanho adequado e uma distribuição uniforme pode melhorar a performance de aderência na interface entre a fôrma de PRFV e o concreto.

Goyal R., Mukherjee e Goyal S. (2016) investigaram a aderência entre uma placa de PRFV e concreto com dois métodos diferentes de ligação: revestimento de areia e ligação com adesivo, utilizando três tipos de adesivo à base de epóxi. Os autores concluíram que apesar de ser conveniente um adesivo com maior tempo de trabalho, os mesmos não são efetivos na aderência deste tipo de sistema. De acordo com os resultados, foi possível determinar uma maior resistência com a ligação direta com o adesivo não-curado com tempo de trabalho de 30 a 45 minutos. Apesar do resultado, é impraticável utilizar adesivos com tão pouco tempo de cura em aplicações reais, tendo em vista a natureza manual desta aplicação e a necessidade imediata de concretagem da fôrma.

### **2.3.2. Comportamento estrutural**

De acordo com o ACI 440.R (2007), lajes mistas de concreto e PRFV com fôrma estrutural aderida maximaliza as vantagens de ambos os materiais ao tempo que simplifica a o processo construtivo e reduz o tempo de execução. Essa afirmação é justificada pelo fato de o concreto possuir ótima resistência à compressão e as fôrmas de PRFV possuírem ótima resistência à tração e fadiga.

O comportamento do PRFV no concreto é caracterizado como linear e elástico até a ruptura com deformações específicas de mais de 20% e baixo módulo de elasticidade, gerando um aumento significativo das deformações após fissurações do concreto e diminuindo a rigidez da estrutura (Weibull; Bastos e Oliveira, 2021). Em virtude disso o dimensionamento de membros estruturais de PRFV são governados pela rigidez e o estado limite de serviço, portanto o comportamento global do membro de PRFV é de interesse primordial (Zoghi, 2014).

Devido ao comportamento elástico-linear até a ruptura durante a concepção estrutural das lajes mistas alguns autores como Gonilha, Correia e Branco (2014) deram preferência para dois tipos de falha: uma ruptura pseudo-dúctil ou a garantia que mesmo sem perda de rigidez, as deflexões a beira do colapso sejam suficientemente grandes indicando a falha na estrutura, ou seja, admite-se que a força última gere um comportamento uma ruptura frágil desde que durante a ação desse carregamento a estrutura deforme-se de tal forma que evidencie o mal funcionamento do sistema e colapso iminente.

Durante o dimensionamento é preciso considerar o posicionamento da linha neutra de forma que o concreto esteja comprimido e a fôrma de PRFV tracionada, otimizando a característica de cada material. Segundo Ortenzi Júnior (2007), o principal problema na compressão de elementos de PRFV ocorre em função da flambagem local devido a esbelteza dos elementos e seu comportamento é considerado de acordo com sua fase polimérica, ou seja, sob domínio da matriz utilizada. Esta afirmação corrobora com os achados de He *et al.* (2012), o qual os principais problemas encontrados na literatura em relação as lajes mistas de concreto e PRFV foram a flambagem prematura das seções vazadas de PRFV, comportamento frágil, ou seja, ruptura sem aviso e capacidade insuficiente da interface concreto-PRFV para fornecer uma ação conjunta entre os elementos estruturais.

Além dos comportamentos mecânicos mencionados, é importante levar em consideração fatores relacionados à durabilidade da estrutura. De acordo com Karbhari *et al.* (2003), ao levar em consideração a degradação e tolerância de danos por soluções alcalinas e umidade, adicionado a ausência de parâmetros de dimensionamento, é preciso garantir que o nível de tensão no compósito seja menos de 25% da capacidade de suporte de projeto da estrutura mista de PRFV.

### **2.3.3. Códigos, padronizações e guias de dimensionamento**

De acordo com Zoghi (2014) diversos guias de dimensionamento e normas foram elaborados ao longo dos anos relacionando a utilização de concreto e PRF (Tabela 1), porém por se tratar de uma nova aplicação do material, há uma quantidade limitada de informações e análises comportamentais. Por isso esses códigos, guias e normas são baseados em normas existentes de concreto armado e precisam ser reavaliados de tempos em tempos para refletir as descobertas atuais da estrutura compósita, aplicações em campo e produtos desenvolvidos.

Os guias, códigos e normas de dimensionamento citados na Tabela 1 relacionam a produção de compósitos e alguns providenciam recomendações de dimensionamento de estruturas reforçadas com barras de polímero reforçado com fibras, todavia não há norma de dimensionamento de fôrmas estruturalmente aderidas de PRFV, sendo esta temática parte do comitê do ACI de número 440-0J – “*FRP Stay-in-Place Forms*” representado pelo pesquisador canadense Amir Fam.

Tabela 1 - Guias de dimensionamento e normas para estruturas de concreto reforçadas com PRF - adaptado (Zoghi, 2014) e (Ascione *et al.*, 2016)

<b>País</b>	<b>Publicação</b>	<b>Ano</b>	<b>Código ou guia</b>
Japão	Japan Society of Civil Engineers (JSCE)	1997	Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials
Noruega	The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology (SINTEF)	1998	EUROCRETE Modifications to NS3473 When Using FRP Reinforcement
Reino Unido	Institute of Structural Engineers (ISE)	1999	Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fiber Composite Reinforcement
Canadá	Canadian Standards Association (CSA-S6)	2000	Section 16: Fiber-Reinforced Structures, Canadian Highway Bridge Design Code
	Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS)	2001	Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers (Design Manual N. 3)
	Canadian Standards Association (CSA-S806)	2002	Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers
Itália	Italian National Research Council	2008	Guide for the Design and Construction of Structures made of Pultruded FRP elements
		2007	ACI 440.R - Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) reinforcement for concrete structures
Estados Unidos	American Concrete Institute Committee 440 (ACI 440)	2015	ACI 440.1R - Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars
		2017	ACI 440.2R - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures
	American Society of Civil Engineers	2010	Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures
	American Composites Manufacturer Association	2010	Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Polymer Structures
Itália	Italian National Research Council	2008	Guide for the Design and Construction of Structures made of Pultruded FRP elements
Alemanha	Deutsches Institut für Bautechnik - DIBt	2005	Medienliste 40 für Behälter, Auffangvorrichtungen und Rohre aus Kunststoff
	Deutsches Institut für Normung - DIN 13121	2010	Structural Polymer Components for Building and Construction
	BÜV – Tragende Kunststoff Bauteile im Bauwesen [TKB]	2010	Richtlinie für Entwurf, Bemessung und Konstruktion
	EUROCOMP		Structural Design of Polymer Composites
União Europeia	Joint Research Center Science for Policy Report	2016	Prospect For New Guidance In The Design Of FRP
	Fédération internationale du béton	2019	Bulletin 90 – Externally applied FRP reinforcement for concrete structures

Apesar de não haver normas de dimensionamento para as fôrmas aderidas de PRFV, autores como Nelson *et al.* (2014) afirmam que diversas investigações ao longo dos anos mostram que a utilização deste sistema pode ser executáveis e atender aos requisitos de norma para resistência e manutenção, não havendo, à princípio, barreiras técnicas para aplicar este tipo de tecnologia em grande escala.

Em virtude disso, entender o comportamento destas estruturas compósitas para servir como base em estudos futuros e elaboração de normas de dimensionamento são essenciais para prever o comportamento de lajes mistas e assumir uma postura menos conservativa por conhecer os mecanismos do sistema, resistência, formas de ruptura e outros.

#### **2.3.4. Bibliografia consultada ligada diretamente ao tema da pesquisa**

A revisão sistemática deste trabalho foi realizada com base nas informações apresentadas por Paul e Criado (2020), utilizando a pesquisa híbrida com base no domínio e revisão bibliométrica, realizando posteriormente uma curadoria dos documentos levantados determinando a relevância dos dados para este trabalho apresentado.

##### *2.3.4.1. Investigações numéricas na literatura*

Mastali, Barros e Valente (2014) analisaram, utilizando método dos elementos finitos, modelos de laje mista de PRFV e argamassa para a otimização estrutural de baixo peso próprio para a aplicação em reabilitação estrutural de edifícios de cantaria (construções com pedras e rochas talhadas). A laje proposta possui uma camada inferior de PRFV com nervuras, preenchimento com espuma de poliuretano e capa superior de argamassa de ultra elevada ductilidade. Por meio das análises os autores constataram que o aumento da espessura da camada de argamassa conduz uma redução das deformações verticais e corresponde a uma diminuição de tensões de compressão nessa região, mas aumentam as tensões de cisalhamento nas nervuras e as tensões de tração na camada inferior da laje. Apesar de haver um aumento na capacidade da laje compósita com o aumento da espessura de concreto com base nas análises numéricas realizadas os autores afirmam que este é o componente que possui menor impacto na capacidade de carga da laje mista, sendo a forma mais eficiente de aumentar a sua resistência por meio do aumento da espessura das nervuras de PRFV.

Muc, Stawiarski e Chwal (2020) analisaram numericamente, utilizando o *software* ANSYS, uma laje mista de PRFV. O modelo computacional foi baseado em uma fôrma permanente de PRFV com a matriz em éster de vinil com a fabricação por pultrusão, utilizando dois tipos de carregamentos distintos em um vão livre de 1,80 m. O primeiro carregamento

analisado foi da fôrma permanente sem o concreto, com a carga de uso e serviço estimada de  $4\text{ kN/m}^2$  e uma carga local de  $1,2\text{ kN}$  distribuída próxima da conexão entre as lajes. O segundo carregamento estudado foi ao final da execução com o concreto armado e uma força de  $10\text{ kN}$ , com o peso de um veículo de acordo com as normas do *Eurocode* e o peso próprio da laje finalizada. Analisando resultados os autores afirmam que o concreto fornece alta rigidez para a estrutura e com base nisto são mais propensas falhas durante o processo construtivo do que na vida útil da laje e informam que a utilização de materiais compósitos em estruturas de concreto gera novas oportunidades no dimensionamento de estruturas na área da construção civil.

#### 2.3.4.2. Investigações experimentais na literatura

Oliva *et al.* (2007) estudaram o comportamento a flexão e conexão de uma viga armada com fôrma pultrudada de perfil “T”, servindo de fôrma permanente para a utilização como vigas de pontes com vãos de  $1,09\text{ m}$  e  $1,83\text{ m}$  variando o tipo de tratamento superficial na fôrma, sem reforço adicional de aço. Os autores constataram que o uso de um revestimento superficial com agregado foi essencial para a ação compósita, sendo a utilização de areia preferível em relação ao cascalho devido a sua resistência inicial a primeira fissura no concreto. Como resultado foi concluído que a chapa de perfil “T” com tratamento superficial de areia com epóxi mostrou-se eficiente para o controle de fissura inicial do concreto e como fôrma permanente.

Honickman (2008) conduziu estudos analíticos e experimentais sobre o comportamento de oito lajes de  $400\text{ mm}$  de largura e alturas variáveis, utilizando fôrmas retas de PRFV como reforço à tração. Os ensaios foram realizados por meio do teste de flexão à quatro pontos com vãos de  $1000\text{ mm}$  e  $2200\text{ mm}$ . Além das lajes, o autor também estudou nove vigas com trapezoidais de PRFV medindo  $3350 \times 609,6 \times 254\text{ mm}$  e altura concretada de  $324\text{ mm}$ , conforme apresentado na Figura 8b. As vigas foram analisadas por meio do mesmo tipo de teste de flexão, para momento positivo e negativo, com e sem vazios internos na seção transversal, para um vão livre de  $3100\text{ mm}$ . Três mecanismos de aderência foram avaliados nos testes experimentais para os dois tipos de elementos estruturais: adesivo epóxi, revestimento de areia e conectores de cisalhamento. O autor identificou que a resistência das estruturas mistas é altamente dependente da qualidade da conexão entre a fôrma de PRFV e o concreto. De acordo com os resultados, a conexão por meio de adesivo epóxi foi o sistema mais efetivo, demonstrando uma maior rigidez do sistema compósito, afirmando também que o sistema com revestimento areia possui comportamento similar em relação à aderência. A resistência desses mecanismos de aderência mostrou-se dependente da resistência ao cisalhamento da pasta de

cimento, sendo possível adotar um valor próximo a 1 MPa como parâmetro de análise para a resistência ao cisalhamento da pasta não confinada.

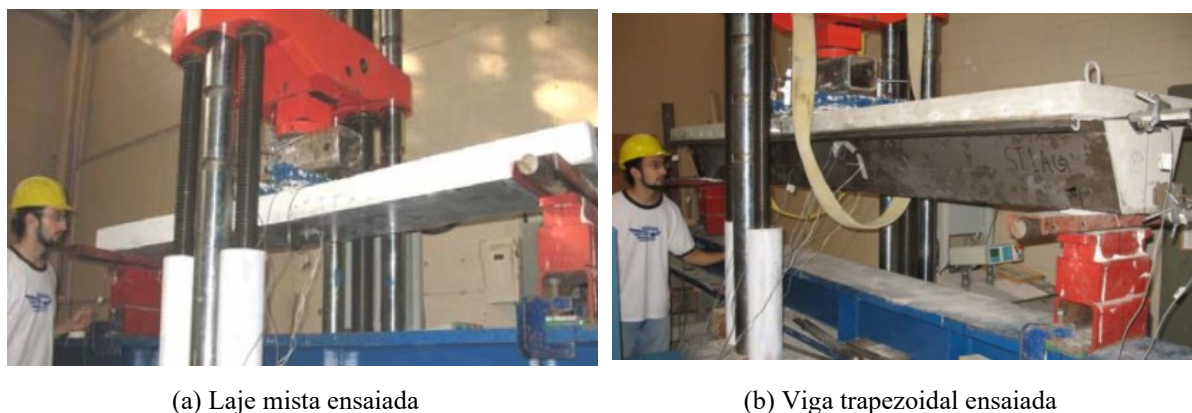


Figura 8 – Lajes e vigas compósitas (Honickman, 2008). (a) Laje compósita ensaiada; (b) Viga trapezoidal ensaiada.

He *et al.* (2012) analisaram um modelo de laje mista com  $1000 \times 143$  mm em um vão livre de 2500 mm, utilizando uma fôrma corrugado de PRFV e enrijecedores tipo “T”, conforme pode ser visto na Figura 9. A estrutura era composta por concreto armado na parte superior com a placa de PRFV substituindo a armadura na parte inferior da laje. Foram verificados o comportamento estático da fôrma de PRFV com carga de construção por meio do carregamento de areia e o comportamento da laje à flexão. Os autores constataram que a estrutura de PRFV mostrou-se resistente e rígida quanto as cargas de construção e que o tratamento na superfície e as barras transversais melhoraram a performance da laje, porém o efeito do tratamento da superfície com o revestimento de areia foi melhor do que os das barras transversais aos furos. Houve dois modos de ruptura: por flexão por meio do descolamento das extremidades da placa de PRFV com fissura no meio do vão e por esmagamento do concreto entre o carregamento e suporte da laje.

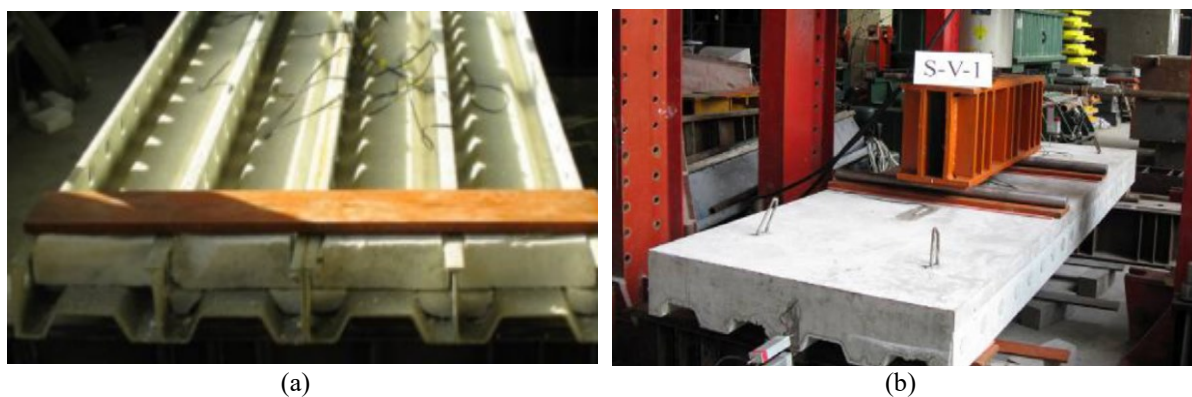


Figura 9 - Laje mista por He *et al.*, (2012): (a) Modelo de PRFV utilizado; (b) Setup do ensaio.



Santos Neto (2006) estudou um sistema estrutural de laje mista de concreto com fibras curtas de polipropileno e vigas de perfis “H” pultrudado em fibra de vidro, com enchimento em blocos de EPS com vãos livres de 2,80 m, 80 cm de largura e 14cm de altura (Figura 10). O autor realizou testes de aderência e ensaiou 3 lajes mistas à flexão a quatro pontos até a ruptura. O melhor desempenho em relação a aderência entre o concreto e perfis de PRFV foi obtido utilizando a resina epóxi como ponte de aderência, não havendo influência da resistência do concreto nos ensaios. A força última na flexão da estrutura apresentou um valor muito mais elevado do que a força correspondente ao limite de flecha em serviço, apresentando um fator de segurança de 3,7. As rupturas variaram entre interface do concreto/PRFV, na alma dos perfis de PRFV e mista englobando os dois tipos de ruptura citados.

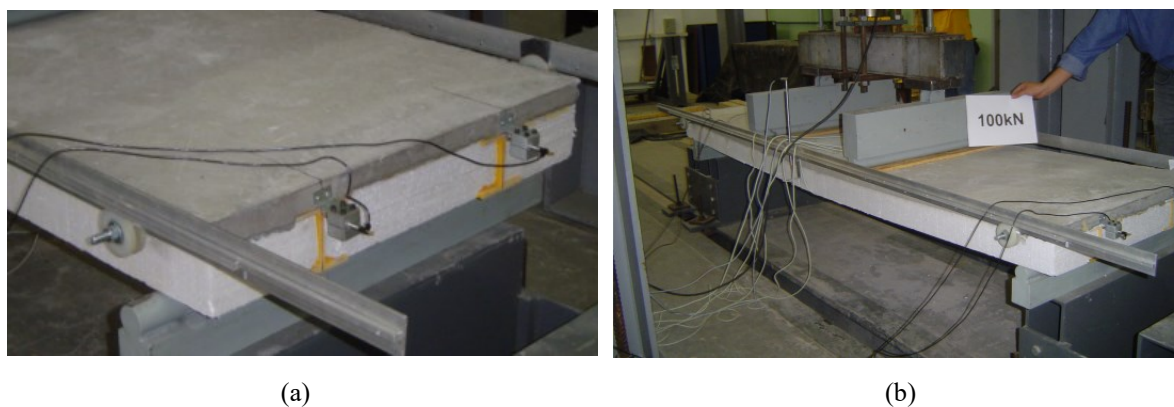


Figura 10 – Modelo analisado por Santos Neto (2006). (a) Laje com perfis de PRFV; (b) *Setup* do ensaio.

Fam e Nelson (2012) estudaram placas corrugadas de PRFV pultrudado de  $457 \times 102$  mm (Figura 11) conectadas entre si por meio de um encaixe e utilizadas como fôrma permanente, substituindo a parte de armaduras inferiores da laje. Os ensaios foram realizados para um vão livre biapoiado de 1.780 mm com a exceção de um modelo de corpo de prova que foi ensaiado com um vão biapoiado de 1.830 mm seguido de um balanço de 1070 mm. O estudo também examinou o efeito da ligação adesiva com epóxi e a influência da espessura da placa no desempenho da laje mista. Os corpos de prova exibiram um carregamento superior ao carregamento de projeto de um eixo de caminhão de 122,5 kN com fator de segurança variando entre 2,4 a 5,67 e deflexão entre 0,26 e 0,59 mm. Todos os corpos de prova tiveram a ruptura por punção associada com o descolamento longitudinal da placa de PRFV. A utilização de ligação adesiva resultou de um aumento de rigidez da estrutura, porém adicionou pouco ganho de resistência ao carregamento último.



Figura 11 - Modelo estudado por Fam e Nelson (2012). (a) Configuração geométrica; (b) *Setup* do ensaio.

Gai *et al.*, (2013) realizaram uma investigação experimental de um novo tipo de laje mista de concreto e perfil de PRFV, podendo ser visualizado na Figura 12a. Trata-se de um conjunto de dois geometricamente diferentes: um perfil pultrudado quadrado vazado de  $10 \times 10$  cm parcialmente preenchido com espuma e um gradeamento na parte superior preenchido de concreto (Figura 12b). Como parte do travamento foram instalados pinos de PRFV revestidos com areia entre o gradeamento e o perfil vazado, o detalhe pode ser visualizado na Figura 12a. Os corpos de prova foram testados à flexão em um vão livre de 290 cm o qual a causa força última se deu devido a separação do banzo superior de compressão e das almas do perfil quadrado, gerando uma falha por flambagem local. Por meio das análises experimentais os pesquisadores verificaram que o modelo proposto exibiu rigidez o suficiente durante a construção e atingiu um comportamento dúctil de resposta, dando aviso de ruptura antes da força última, afirmando que houve uma ação compósita entre os materiais e que os pinos transversais de PRFV auxiliaram na robustez do sistema.

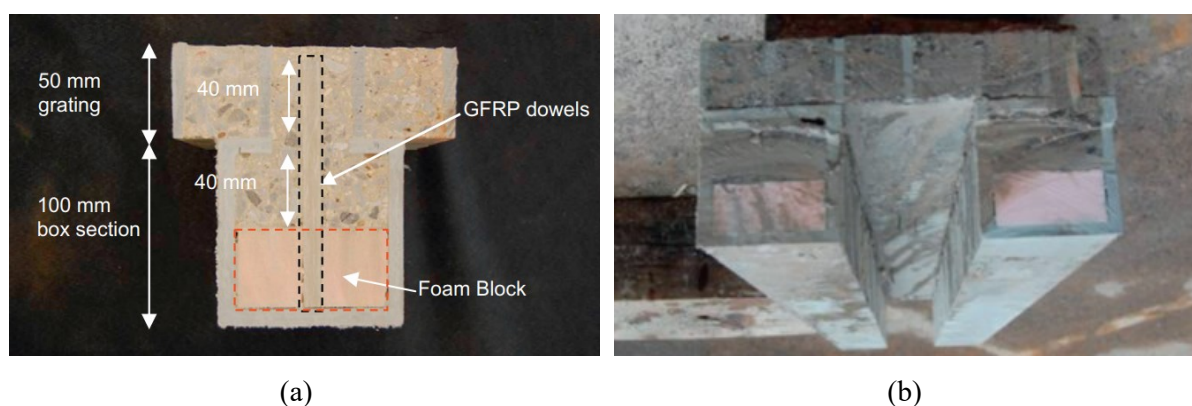


Figura 12 - Modelo proposto por Gai *et al.* (2013): (a) Seção transversal proposta; (b) Realização do ensaio

Uma laje mista com fôrma aderida utilizando perfis pultrudado em “T” (Figura 13) foi analisada em uma série de pesquisas por Nelson *et al.*, (2013), Nelson, Eldridge e Fam (2013) e Nelson e Fam (2014). Nos estudos realizados as lajes mistas foram comparadas com lajes

convencionais de concreto armado, foram examinados os efeitos de conexão adesiva, os tipos de ruptura e deflexões, largura das fôrmas, influência da variação da resistência do concreto, efeito do espaçamento das vigas e outros. Dentre os principais resultados dos autores, pode-se citar:

- A falha da conexão adesiva se inicia com uma força 2,8 a 3,6 vezes maior que o carregamento máximo no estado limite de serviço e 58% do carregamento gera efeito de punção;
- A ausência de barras na camada superior na laje diminuiu cerca de 17% da resistência à punção da laje;
- A laje obteve comportamento pseudo-dúctil, com performance inicialmente governada pela flexão e a carga última determinada pela punção;
- Aumentando a resistência à compressão do concreto de 17 MPa para 42 MPa aumentou a resistência última da laje em 20%, mas não influenciou na sua rigidez;
- A relação entre a largura e o vão livre ( $w/s$ ) das lajes possui um impacto na resistência máxima, rigidez e modo de ruptura. Sendo a relação mínima ( $w/s$ ) que deve ser usada para simular condições reais em pontes completas é 1,5.
- A utilização da conexão adesiva aumentou a resistência última e rigidez inicial em 30% e 73%, respectivamente;
- As extremidades das lajes apresentaram a restrição mais fraca, correspondendo em 24% da resistência do meio do vão.



(a)



(b)

Figura 13 - Modelo de laje mista: (a) Modelo da laje. (Nelson *et al.*, 2013); (b) *Setup* do ensaio. (Nelson; Fam, 2014)

Gonilha, Correia e Branco (2014) apresentaram uma análise numérica e experimental de uma laje mista utilizando perfil de PRFV em com seção transversal “I” e uma capa de concreto reforçado com fibra de vidro autoadensável focada em um protótipo de passarela com

200 cm de largura e vão livre de 5,5 m (Figura 14), na qual a conexão entre os materiais foi realizada por meio da utilização de uma camada adesiva e *studs* de aço. As análises estruturais mostraram um comportamento linear-elástico até a ruptura, sendo esta uma ruptura frágil desencadeada pelo cisalhamento na junção entre a alma e a flange do perfil de PRFV. Essa ruptura ocorreu quando a deflexão atingiu 126,3 mm (Figura 14 b), correspondendo aproximadamente a uma deformação de 1/43,5 do vão. Os autores afirmam que apesar de não haver perda crítica de rigidez na estrutura antes da ruptura, tal deformação constituiu um claro aviso de mal funcionamento, colapsando com uma força de 232 kN que corresponde a aproximadamente 4,2 vezes o carregamento característico de passarelas para pedestres.



Figura 14 - Estudo realizado por Gonilha, Correia e Branco (2014): (a) Vista frontal (b) Deformação antes da ruptura.

Fang *et al.*, (2016) estudaram analiticamente e experimentalmente uma laje compósita de  $600 \times 400$  mm armada com uma grelha de PRFV de 6 mm com o compósito funcionando como fôrma permanente para um vão de 1400 mm. A grelha e a fôrma inferior foram produzidas por meio do método manual, o qual o *design* pode ser visualizado na Figura 15, sem barras adicionais na área superior. Os pesquisadores examinaram as duas principais formas de ruptura, sendo estas rupturas por flexão e cisalhamento. Por meio das análises concluíram que a rigidez à flexão e a capacidade resistente da laje poderia ser melhorada reduzindo o espaçamento da malha de PRFV. Os autores também observaram que o aumento da espessura da fôrma inferior de 3 mm para 6 e 9 mm diminuíam o carregamento final em 8,1% e 10%, respectivamente, e reduziam a deflexão 12,9% e 35,3%. Esse comportamento é dado ao fato que uma maior espessura aumentava a rigidez da laje, porém essa configuração exige um esforço maior entre a conexão da grelha e da fôrma para que os mesmos mantenham sua ação compósita, fazendo com que a ruptura por cisalhamento seja mais dominante quanto maior a espessura da fôrma inferior neste modelo analisado.



Figura 15 - Modelo de laje proposta por Fang *et al.*, (2016): (a) Design proposto; (b) *Setup* do ensaio

Zuo *et al.*, (2018) estudaram o comportamento de uma laje mista de PRFV e concreto com perfis do tipo “T” pultrudado perfurado medindo  $220 \times 125$  cm com um vão livre de 200 cm submetidos ao esforço de flexão à quatro pontos (Figura 16). A conexão da laje mista foi realizada de duas formas por meio da utilização de perfis perfurados tipo “T” com barras de aço e de PRFV transversais aos furos e uma malha de aço na área superior para promover ductibilidade na estrutura. Os autores utilizaram um revestimento de areia aderida com epóxi para promover a aderência entre o concreto e a fôrma permanente e o compararam com um espécime sem o revestimento de areia. Foram encontradas três formas de ruptura: cisalhamento diagonal, flexão e cisalhamento longitudinal, com ruptura frágil. Por meio dos ensaios realizados os autores constataram que a rigidez da laje mista foi aumentada com o tratamento na superfície com areia, que a variação de altura da fôrma altera a rigidez da laje, mas possui pouca influência na capacidade resistente ao cisalhamento e que as barras de flexão melhoram significativamente a rigidez e a resistência última da estrutura.

Posteriormente Zuo, Liu e He (2018) estudaram o comportamento da mesma laje mista quando submetida ao momento negativo com a utilização de barras de aço negativas e variação de taxa de armaduras. Foram encontradas duas formas de rupturas diferente: flexão e cisalhamento. Antes de obter o carregamento último da estrutura pode-se observar uma deformação plástica de 40 mm, com um coeficiente de deslocamento dúctil de 3,1. Os autores concluíram que as barras utilizadas na região de suporte auxiliaram no aumento de rigidez e capacidade última, especialmente para a resistência ao cisalhamento e atestaram que a laje mista possui um comportamento parcialmente compósito entre o concreto, aço e fôrma permanente de PRFV.

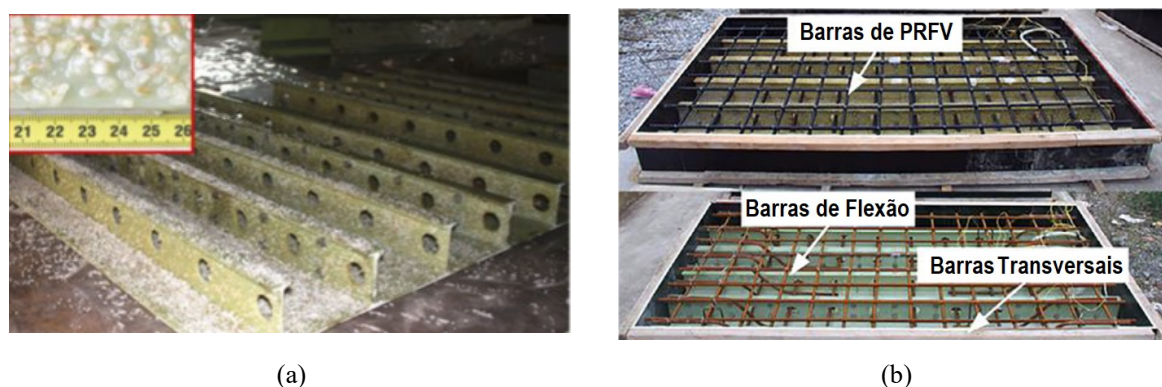


Figura 16 – Laje proposta por Zuo *et al.*, (2018) e Zuo, Liu e He (2018): (a) Tratamento de areia; (b) Montagem.

Siwowski e Rajchel (2019) desenvolveram um sistema híbrido composto por uma viga trapezoidal de  $155 \times 102,5$  cm de PRFV produzida à vácuo (Figura 17a) e uma laje de 180 mm de concreto armado com barras de fibra de vidro, agindo como um sistema conjunto. O corpo de prova foi testado em tamanho real, com um vão livre de 21 metros e foram realizados testes de estática, dinâmica e fadiga. A conexão entre a viga de PRFV e o concreto foi realizada por meio de pinos de aço e instalados diafragmas ao longo do comprimento da viga para aumentar a rigidez à torção e flambagem. A estrutura se comportou elasticamente com um carregamento total de 1550 kN não atingindo a ruptura, com um fator de segurança entre 2,22 a 3,76 e após dois milhões de ciclos no ensaio de fadiga a estrutura reteve praticamente 100% de sua rigidez inicial. Posteriormente Siwowski, Rajchel e Wlasak (2021) estudaram o comportamento estrutural em uma estrutura similar de  $138 \times 71,5$  cm e uma capa de concreto com 130 mm utilizando adesivo epóxi para conectar a viga de PRFV e o concreto (Figura 17 b). A estrutura se comportou elasticamente até uma força de 702 kN e rompeu devido o descolamento da laje sanduíche, seguido de uma deformação progressiva da viga devido a deformação dos diafragmas internos. A segurança global da estrutura determinada experimentalmente foi 3,0.



Figura 17 – Vigas compósitas de PRFV em formato trapezoidal. (a) Trabalho inicial de Siwowski e Rajchel, (2019); (b) Continuação da pesquisa por Siwowski, Rajchel e Wlasak (2021).

Quatro lajes compósitas foram investigadas por Pournasiri, Pham e Hao (2022), medindo  $600 \times 604 \times 65$  mm. Foram utilizadas placas de GFRP com uma espessura de 3,2 mm e apresentavam duas configurações de reforço: enrijecedores em formato de "Y" e de seção quadrada vazada, conforme apresentado na Figura 18. A placa de GFRP possuía uma resistência à tração de 620,5 MPa e um módulo de elasticidade de 34,7 GPa, enquanto os enrijecedores apresentavam uma resistência à tração de 206,8 MPa e um módulo de elasticidade de 20,7 GPa. Os testes representavam um tabuleiro de ponte com um vão de 1.830 mm entre as vigas, simulando uma escala de 1:2,75, e a força foi aplicada pontualmente por meio de uma chapa de aço de 91 mm x 182 mm. Os estudos realizados mostraram que o enrijecedor em formato de "Y" apresentava uma resistência 48% maior em comparação com o reforço de seção oca quadrada. Além disso, os autores observaram que a configuração geométrica da forma influenciava significativamente a capacidade de carga, principalmente em termos de resistência ao cisalhamento.

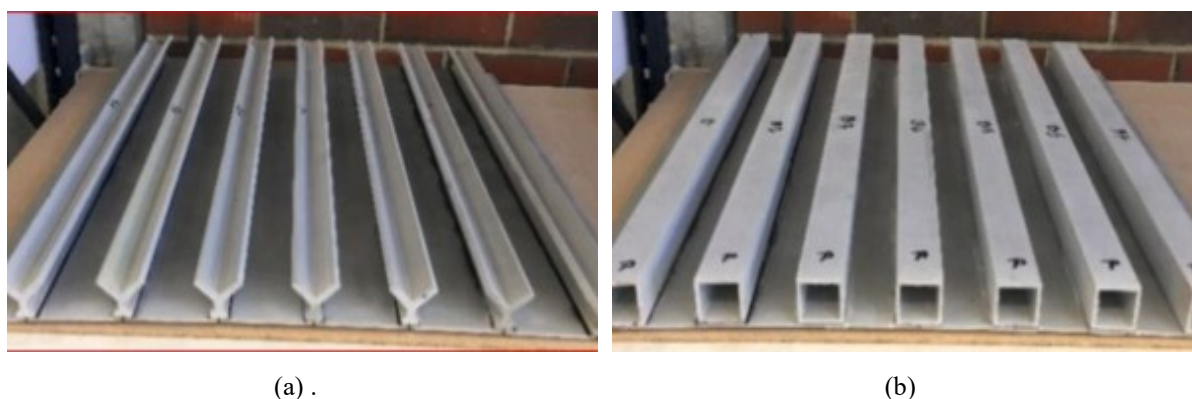


Figura 18 - Fôrmas de PRFV utilizadas na produção das lajes (Pournasiri; Pham; Hao, 2022). (a) Enrijecedor em "Y". (b) Seção quadrada vazada.

Goyal *et al.* (2022) analisaram o uso de uma fôrma de PRFV com enrijecedores tipo "T" com altura de 50 mm e espessura de 4,5 mm em lajes de concreto com dimensões de  $3200 \times 380 \times 150$  mm e  $1100 \times 600 \times 200$  mm. Eles realizaram testes em quatro corpos de prova de cada conjunto, variando o tipo de ligação interfacial entre eles. A placa de GFRP tinha uma resistência à tração de 373,5 MPa e um módulo de elasticidade de 27,9 GPa, enquanto os enrijecedores apresentavam uma resistência à tração de 352,3 MPa e um módulo de elasticidade de 23,8 GPa. A verificação foi realizada por meio de um teste de flexão à quatro pontos, que revelou uma capacidade de carga 107% maior do que as lajes convencionais com barras de aço. Além disso, o tratamento da interface aumentou a capacidade de carga em aproximadamente 215%. O estudo concluiu que esse sistema melhora a eficiência construtiva e estrutural, mas

novos padrões de enrijecedores precisam ser analisados para aproveitar totalmente suas capacidades.



Figura 19 - Laje investigada por Goyal *et al.*, (2022) (a) modelo da seção transversal; (b) fôrma de PRFV utilizada.

#### 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na primeira parte deste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados aos polímeros reforçados com fibras, desde sua constituição, propriedades a fabricação.

Na segunda parte foram apresentadas as propriedades do concreto reforçado com fibras, bem como um breve histórico de sua utilização. Com base das informações expostas e consoante com a bibliografia de base, é possível afirmar que a incorporação das fibras de alto módulo de elasticidade na matriz cimentícia tem como a finalidade principal o aumento da resistência à tração e ductibilidade do concreto. Essa adição não altera significativamente a resistência última à compressão, porém o comportamento dúctil é desejável na laje mista para evitar ruptura frágil no estado endurecido, quando não há presença de armaduras adicionais. Concomitantemente, ao optar por um concreto autoadensável reforçado com fibras, sem a utilização de telas ou barras adicionais, aumenta-se a produtividade na execução do elemento estrutural, eliminando etapas como armação, vibração e acabamento do concreto.

Já na terceira parte deste capítulo foi apresentado o conceito de laje mista, os tipos de conexões entre seus materiais, comportamento estrutural, códigos e normas existentes relacionados ao PRFV e trabalhos existentes na área.

Nos capítulos subsequentes, os conceitos apresentados no Capítulo 2 serão utilizados para apresentar um estudo analítico, interpretar e analisar os resultados dos ensaios experimentais, bem como servir de apoio para as conclusões finais.



### 3. ESTUDO ANALÍTICO

Nesta etapa do trabalho foi proposto um modelo analítico para o dimensionamento de lajes mistas com fôrmas permanentes de PRFV, realizado o pré-dimensionamento da laje mista e, utilizando-se deste modelo proposto, realizado um estudo paramétrico capaz de embasar as decisões para o estudo experimental realizado. Para que o estudo refletisse as propriedades dos materiais e englobasse as informações obtidas em pesquisas anteriores foi realizado um levantamento da bibliografia de base, delimitando as principais referências, o progresso da temática no meio científico, materiais utilizados e definição dos parâmetros a serem estudados. Após o levantamento das principais referências e características das lajes mistas, iniciou-se o estudo paramétrico do modelo, levantando os esforços solicitantes, momento resistente, deformações e comportamento no estado limite último e de serviço da laje mista. Nesta etapa foram delimitadas a geometria da fôrma permanente e as propriedades do PRFV. Com base nos resultados obtidos foram tomadas decisões a respeito dos modelos experimentais construídos no programa experimental.

A laje mista foi pré-dimensionada por meio de um modelo analítico proposto para o dimensionamento à flexão, considerando o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS). Uma limitação do modelo proposto é a não consideração da possibilidade de outros modos de ruptura, tal como a ruptura por cisalhamento longitudinal, comum nas lajes mistas. Isto se deve ao fato de ainda não se ter dados experimentais suficientes para tentar prever esse modo de ruptura para o sistema de lajes mistas proposto. Ademais, admite-se que a conexão entre concreto e fôrma deve ser suficiente para que o modo de ruptura seja por flexão, possuindo um comportamento mais de ruptura desejável ao invés do cisalhamento.

Todavia faz-se necessário acrescentar que o modelo proposto deve ser considerado com devida cautela em função do tratamento realizado, tendo em vista que o modelo não é capaz de prever um modo de ruptura provável em função restrita ao cisalhamento longitudinal entre a fôrma e concreto.

O modelo proposto para o dimensionamento ao ELU considera um modelo estrutural unidirecional, de forma simplificada e utilizando o método da seção transformada de Timoshenko. Foi admitido um comportamento generalizado considerando uma compatibilidade de deformações dos elementos e o princípio do equilíbrio interno das forças, com o comportamento da fôrma trapezoidal de PRFV como elástico-linear, e do concreto sendo elástico não-linear. No ELU o estudo analítico estimou a capacidade resistente da laje. No ELS são estimadas as deflexões máximas no estágio inicial, quando a fôrma de PRFV resiste sozinha

o peso próprio do concreto, e final, quando a fôrma resiste em conjunto com o CARFA o peso próprio e cargas de uso. Os cálculos oriundos do estudo proposto são apresentados no apêndice A e os resultados resumidos no capítulo de resultados, item 5.3.6.

Devido à ausência de norma técnica específica para dimensionamento de elementos mistos de concreto e fôrma permanente de PRFV, optou-se por utilizar como inspiração o dimensionamento da norma ABNT NBR 8.800 (2008), utilizada comumente no dimensionamento do *steel deck*, e a norma americana ACI 440.2R (2017). Realizou-se a verificação do ELS por meio da ABNT NBR 8.800 (2008), dividida entre duas etapas: fase inicial e final.

### 3.1. CARGAS CONSIDERADAS (Q)

As cargas consideradas ( $Q_s$ ) foram delimitadas em relação à etapa construtiva e à etapa de utilização. Para a etapa construtiva foi considerada a aplicação da carga diretamente na fôrma permanente, já para a etapa de utilização a carga foi considerada para a laje mista. A geometria utilizada no modelo, bem como suas medidas e a representação de cargas utilizadas são ilustradas por meio da Figura 20. A delimitação de cada carga utilizada está detalhada do item 3.1.1 a 3.1.4.

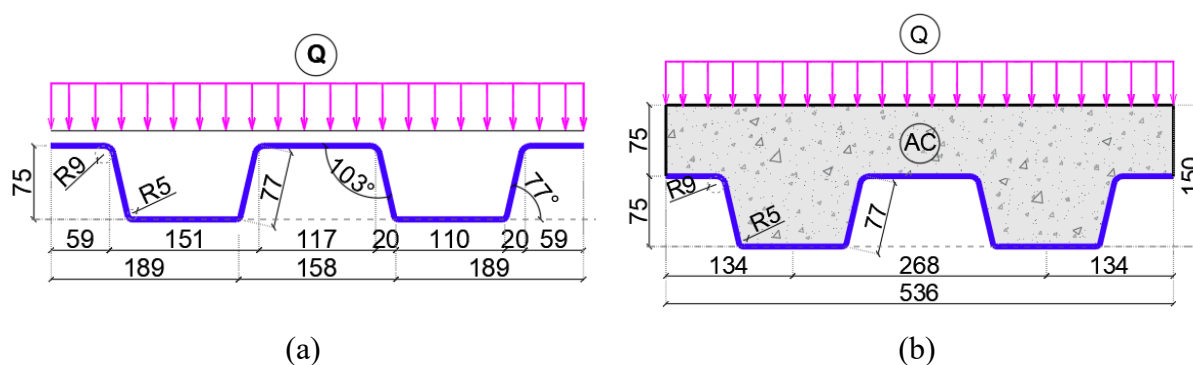


Figura 20 - Geometria utilizada no modelo analítico.

#### 3.1.1. Peso próprio da fôrma de PRFV:

De acordo com o ACI 440.2R (2017), a densidade típica dos materiais com PRFV varia entre 11,8 a 20,6 kN/m<sup>3</sup>, todavia este item foi desprezado pois devido à espessura da fôrma trapezoidal, o peso total da fôrma torna-se desprezível quando comparado aos demais componentes.

### 3.1.2. Peso próprio do concreto:

O peso específico adotado foi igual ao tipicamente utilizado para o concreto simples, igual a  $24 \text{ kN/m}^3$ , desprezando a variação causada pela adição de fibras. A área de concreto ( $A_c$ ) da seção transversal do concreto para a configuração de duas nervuras foi estimada em  $593,40 \text{ cm}^2$ .

### 3.1.3. Peso próprio de elementos construtivos

As cargas provenientes do peso próprio dos elementos construtivos foram definidas de acordo com a ABNT NBR 6.120 (2019), sendo  $1,00 \text{ kN/m}^2$  para revestimento de pisos edifícios residenciais e  $0,25 \text{ kN/m}^2$  para forro de gesso acartonado, com estrutura de suporte.

### 3.1.4. Sobrecarga de construção:

De acordo com a ABNT NBR 8.800 (2008) a sobrecarga de construção deverá ser adotada de acordo com o efeito mais nocivo dos seguintes valores:

- a) carga uniformemente distribuída com no mínimo  $1 \text{ kN/m}^2$  ou
- b) carga linear de  $2,2 \text{ kN/m}$  perpendicular à direção das nervuras da fôrma, na posição mais desfavorável, somente para verificação do momento fletor.

### 3.1.5. Sobrecarga de uso:

A sobrecarga de uso foi considerada para fins residenciais que, de acordo com a ABNT NBR 6.120 (2019), é igual a  $1,5 \text{ kN/m}^2$  para dormitórios e salas.

## 3.2. HIPÓTESES BÁSICAS PARA O DIMENSIONAMENTO

As hipóteses descritas são válidas para elementos lineares sujeitos a solicitações normais no estado limite último (ELU), estabelecendo critérios para a determinação de esforços resistentes da laje compósita de PRFV.

- a) As seções transversais permanecem planas após a deformação;
- b) No ELU despreza-se obrigatoriamente a resistência do concreto à tração e do PRFV à compressão;
- c) A deformação máxima da fôrma de PRFV é dada por meio do cálculo da deformação efetiva e posteriormente minorada, devido à ausência de escoamento do material;

- d) A distribuição de tensões de compressão no concreto é feita por meio do diagrama de tensão-deformação retangular simplificado do diagrama parábola-retângulo;
- e) A deformação devido ao cisalhamento na camada adesiva é desprezada devido a espessura do material, com baixa variação de espessura;
- f) O comportamento do PRFV é linear elástico até a ruptura.

### 3.3. COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO DAS AÇÕES

As ações estimadas para a estrutura precisam ser ponderadas para garantir a segurança do sistema estrutural, levando em consideração a variação das ações, a possibilidade de ocorrência simultânea e erros que possam ocorrer na avaliação os efeitos dessas ações, conforme equação (1) da ABNT NBR 8.800 (2008).

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma_{f1}$  = Coeficiente que considera a variação das ações;

$\gamma_{f2}$  = Parcela para a simultaneidade de atuação das ações;

$\gamma_{f3}$  = Coeficiente que considera erros de avaliação dos efeitos das ações de valor igual ou superior a 1,10.

Em geral o produto do coeficiente de variação e erros de avaliação é representado por  $\gamma_g = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$  e a parcela para a simultaneidade de atuação das ações é calculada por meio da combinação de fatores de redução, para as situações de estado limite último e estado limite de serviço.

#### 3.3.1. Coeficientes de ponderação para o estado limite último

O coeficiente de ponderação  $\gamma_g$  considera a variabilidade das ações e os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, sendo divididos entre combinações normais e de construção de acordo com a Tabela 2. Os valores para os coeficientes foram retirados da ABNT NBR 8.800 (2008).

O coeficiente de simultaneidade  $\gamma_{f2}$  adotado foi de 0,5 para as ações variáveis causadas pelo uso e ocupação da edificação, que possui acesso residencial e restrito.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes		Ações indiretas	Ações variáveis
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de elementos construtivos		
Normais	1,3	1,5	1,2	1,5
Especiais ou de construção	1,2	1,4	1,2	1,3

### 3.3.2. Coeficientes de ponderação para o estado limite de serviço

Para a verificação em serviço o coeficiente de ponderação  $\gamma_g$  é admitido como 1,0 e o coeficiente de simultaneidade será o mesmo adotado no estado limite último, com valor de 0,5.

## 3.4. PONDERAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO PRFV

### 3.4.1. Coeficiente de ponderação devido à exposição ambiental

De acordo com o ACI 440.2R (2017), a exposição a longo prazo às intempéries pode reduzir as propriedades de tração, fluência e fadiga dos PRFV. Em virtude disso, as propriedades dos materiais devem ser reduzidas utilizando um coeficiente ambiental  $C_E$ , por meio da equação (2), baseado no material e na condição de exposição do elemento.

Como uma estimativa preliminar, para fins de pré-dimensionamento, que se deu antes da caracterização dos compósitos usados no programa experimental, os valores para  $f_{fu}^*$  e  $\varepsilon_{fu}^*$  foram retirados da ACI 440.2R (2017), sendo respectivamente 552 N/mm<sup>2</sup> e 0,020 mm/mm. Posteriormente, após os ensaios de caracterização dos materiais, os valores encontrados foram atualizados e a estimativa analítica foi comparada com o resultado experimental.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (3)$$

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (4)$$

Onde:

$C_E$  = Coeficiente de redução ambiental, sendo 0,75 para PRFV em ambientes internos;

$f_{fu}^*$  = Resistência última à tração característica em MPa;

$\varepsilon_{fu}^*$  = Deformação última característica de ruptura (mm/mm);

$E_f$  = Módulo de elasticidade do compósito em MPa.

### 3.4.2. Resistência nominal à flexão

Para a estrutura proposta são assumidas três possíveis formas de rupturas, associadas às deformações limites dos materiais:

- a) Destacamento da fôrma em relação ao seu substrato;
- b) Esmagamento do concreto;
- c) Ruptura da fôrma de PRFV.

O destacamento da fôrma trapezoidal da matriz de concreto pode ser gerado por meio das fissuras intermediárias do mesmo. Para prevenir estas fissuras que podem induzir o destacamento da fôrma a ACI 440.2R (2017) limita a deformação do PRFV de acordo com a seguinte inequação:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{ck}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad (5)$$

Onde:

$\varepsilon_{fd}$  = Deformação de destacamento do PRFV (mm/mm);

$\varepsilon_{fu}$  = Deformação de ruptura de projeto do PRFV (mm/mm);

$f_{ck}$  = Resistência específica à compressão do concreto em MPa;

$t_f$  = Espessura nominal da fôrma de PRFV (mm);

$n$  = Número de faces da fôrma envoltas da nervura.

É necessário determinar uma deformação efetiva de projeto para o PRFV devido seu comportamento linear elástico. Esta deformação irá governar a forma de ruptura, seja pelo esmagamento do concreto, ruptura da fôrma ou destacamento da fôrma do substrato de concreto. A deformação efetiva é determinada pela seguinte inequação:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - x}{x} \right) \leq \varepsilon_{fd} \quad (6)$$

Onde:

$\varepsilon_{fe}$  = Deformação efetiva da fôrma de PRFV atrelada ao modo de ruptura (mm/mm);

$\varepsilon_{cu}$  = Deformação última do concreto, admitido como 3‰;

$d_f$  = Altura útil da fôrma de PRFV (mm);

$x$  = Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra (mm).

Se o cálculo de  $\varepsilon_{fe}$  for menor, o concreto controla o modo de ruptura, se  $\varepsilon_{fd}$  for menor, a falha do PRFV controla o modo de ruptura da seção.

Dessa forma, a tensão máxima de tração ponderada  $f_{fe,d}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe,d} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (7)$$

### 3.4.3. Resistência nominal à força cortante

A deformação ao cisalhamento efetiva está ligada com o confinamento da seção e o destacamento do concreto antes da perda da fricção do agregado (*aggregate interlock*). De acordo com o ACI 440.2R (2017), este coeficiente de redução de aderência pode ser calculado com base nas seguintes equações:

$$\varepsilon_{fe,v} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (8)$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (9)$$

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (10)$$

$$k_1 = \left( \frac{f_{ck}}{27} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad (12)$$

Onde:

$\varepsilon_{fe,v}$  = Deformação efetiva da fôrma do compósito atrelada ao cisalhamento;

$\kappa_v$  = Coeficiente de redução de aderência ao cisalhamento;

$k_1$  = Fator de modificação em relação à resistência do concreto;

$k_2$  = Fator de modificação em relação ao tipo de envoltória da fôrma;

$L_e$  = Comprimento ativo de aderência da fôrma de PRFV (mm);

$d_{fv}$  = Altura útil da fôrma de PRFV – no cisalhamento (mm).

### 3.5. SEÇÃO TRANSVERSAL GEOMÉTRICA E EFETIVA

Na seção transversal podem existir áreas que não contribuem efetivamente para a capacidade resistente da fôrma. Em virtude disso, as extremidades curvas dos seguimentos da forma foram desprezadas na largura efetiva ( $b_{ef}$ ) das mesmas, conforme mostra na Figura 21.

Além do fato exposto, quando a posição da linha neutra estiver localizada na fôrma deve-se descontar da área efetiva a seção comprimida da fôrma. Dessa forma, a altura total dos

segmentos verticais foi simplificada para representar a diferença entre a altura total e o somatório da espessura da fôrma e altura da linha neutra, conforme Figura 21b.

A área efetiva foi considerada sendo a multiplicação da largura efetiva ( $b_{ef}$ ) pela espessura ( $e$ ).

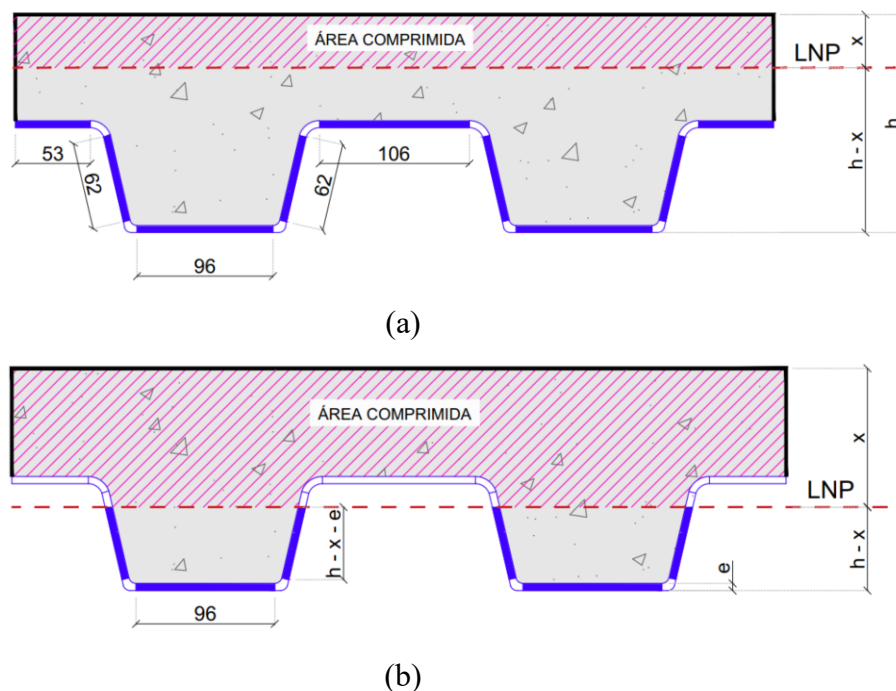


Figura 21 - Segmentos da seção efetiva.

### 3.6. COMBINAÇÕES DE AÇÕES ÚLTIMAS E DE SERVIÇO

De acordo com a ABNT NBR 8.800 (2008) as combinações últimas de ações são classificadas em normal, especial, de construção e excepcional.

#### 3.6.1. Combinações últimas normais

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (13)$$

Onde:

$F_d$  = Força ponderada;

$\gamma_{gi}$  = Coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{Gi,k}$  = Ações permanentes;

$\gamma_{q1}$  = Coeficiente de ponderação das ações variáveis;

$F_{Q1,k}$  = Ações variáveis;



$\gamma_{qj}$ = Coeficiente de ponderação das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal;

$\psi_{0j}$ = Fator de combinação para ações variáveis;

$F_{Qj,k}$ =Ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

### 3.6.2. Combinações últimas de construção

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Q\_cons}) \quad (14)$$

Sendo:

$F_{Q\_cons}$ =Ações provenientes das cargas de construção.

### 3.6.3. Combinações de ações de serviço

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (15)$$

Sendo:

$F_{ser}$ =Combinação de forças quase permanentes de serviço;

$\psi_{2j}$ = Fator de combinação para ações variáveis de serviço.

### 3.6.4. Verificação da laje mista no estado limite último

A resistência última das lajes foi calculada levando-se em consideração o equilíbrio interno das forças na seção transversal, baseando-se no ACI 440.2R (2017). Foram levantados os valores de momento fletor resistente e força cortante vertical resistente para a fase inicial e para a fase final da laje mista.

A fase inicial é composta pela análise da fôrma permanente de PRFV durante a construção, determinando-se as cargas construtivas referente ao peso próprio do concreto no estado fresco e peso dos equipamentos e operários durante a construção (sobrecarga de construção).

Já a fase final é composta pela análise da laje mista em sua ação compósita, ou seja, utilizando a resistência do concreto e da fôrma permanente de PRFV.

### 3.6.5. Determinação do momento fletor resistente

A formulação dos esforços internos resistentes foi realizada com base no equilíbrio de forças normais à seção transversal e dos momentos fletores, satisfazendo a compatibilização de deformações e considerando o modo de ruptura. O somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, sendo  $N_{cf}$  a força de compressão do concreto e  $N_{frp}$  a força de tração na fôrma, que formam um binário oposto ao momento solicitante, proporcionando o dimensionamento da seção transversal. Os cálculos para as forças das seções foram realizados de acordo com as equações (16) a (18).

$$N_{cf,I} = 0,85 \cdot b \cdot t_c \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \text{ para } x \geq t_c \quad (16)$$

$$N_{cf,II} = 0,85 \cdot b \cdot x_i \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \text{ para } x < t_c \quad (17)$$

$$N_{frp} = A_{ef,t} \cdot f_{fe,d} \quad (18)$$

Onde:

$N_{cf}$  = Força de compressão no concreto;

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

$b$  = Largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;

$t_c$  = Altura da laje de concreto acima do topo da fôrma;

$N_{frp}$  = Força de tração na fôrma de PRFV;

$\beta_1$  = Fator de transformação do diagrama de tensões, admitindo-se o valor de 0,8;

$A_{F,ef}$  = Área da seção efetiva da fôrma.

Com base no princípio do equilíbrio das forças internas é possível igualar a força interna de compressão do concreto com a força interna de tração na fôrma, de forma que isole a linha neutra  $x$ , verificando-se se a mesma se encontra dentro ou fora da fôrma, de acordo com a equação (19). O processo de equilíbrio das forças normais à seção transversal, dos momentos fletores e a compatibilização de deformações é realizado por meio de um processo iterativo, o qual determina-se inicialmente uma posição para a linha neutra e a partir disso refina-se o cálculo até o ponto de convergência aceitável.

$$x = \frac{A_{ef,t} \cdot f_{fe,d}}{0,85 \cdot b \cdot f_{ck} \cdot \beta_1} \quad (19)$$

O cálculo do momento resistente da seção irá variar de acordo com a posição da linha neutra elástica (LNE), dessa forma, o momento fletor resistente da seção  $M_n$  é determinado pela equação (20).

$$M_r = \psi_f \cdot N_{frp} \cdot y_I \quad (20)$$

Onde:

$M_r$  = momento fletor resistente da seção;

$\psi_f$  = coeficiente de minoração devido às incertezas do material, sendo admitido pelo ACI 440.2R (2017) o valor de 0,85;

$y_i$  = distância entre as forças resistentes, variando com a posição da linha neutra.

Nas configurações em que a posição da linha neutra estiver acima da fôrma (Figura 22) ou no alinhamento da mesma (Figura 23) a distância entre as forças resistentes será calculada de acordo com a equação (21).

Nas configurações em que a posição da linha neutra estiver dentro da fôrma (Figura 24), a altura do bloco de compressão está condicionada à tensão máxima efetiva admissível da fôrma de PRFV, não sendo maior que a espessura da capa de concreto, podendo ser calculada por meio da equação (22).

$$y_I = d_{f,I} - \beta_1 \cdot x \cdot 0,5 \quad (21)$$

Sendo:

$y_I$  = distância entre as forças resistentes quando a LNE está acima da fôrma;

$d_{f,I}$  = distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva resistente da fôrma.

$$y_{II} = d_{f,II} - \beta_1 \cdot x_{II} \cdot 0,5 \quad \text{onde:} \quad \beta_1 \cdot x_{II} \leq t_c \quad (22)$$

Onde:

$y_{II}$  = distância entre as forças resistentes quando a LNE está abaixo da fôrma;

$d_{f,II}$  = distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva resistente da fôrma.

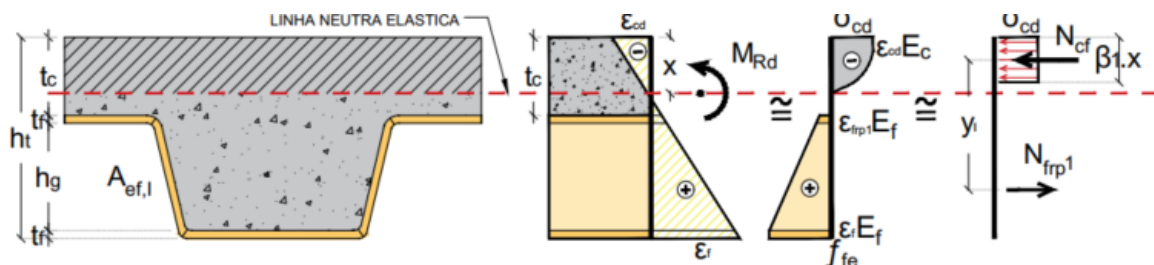


Figura 22 - Esforços internos com a linha neutra acima da fôrma

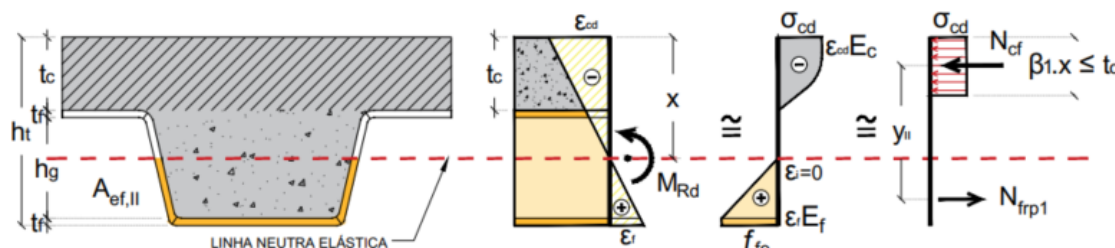


Figura 23 - Esforços internos com a linha neutra no alinhamento da fôrma

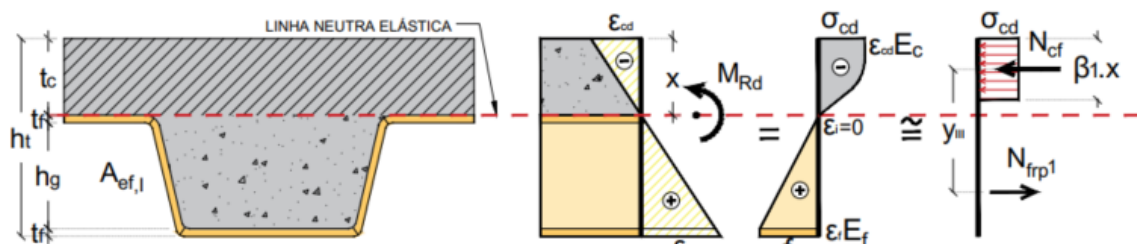


Figura 24 - Esforços internos com a linha neutra abaixo da fôrma

Após ser determinado o momento fletor resistente da seção, o mesmo deve ser comparado ao momento fletor solicitante utilizando o seguinte critério de segurança:

$$\phi \cdot M_r \geq M_s \quad (23)$$

Sendo:

$M_s$  = Momento fletor solicitante da seção de acordo com a fase e combinação estudada;

$\phi$  = Coeficiente de redução de resistência, admitido como 0,8 para este trabalho.

### 3.6.6. Determinação da força de cisalhamento resistência

A resistência nominal ao cisalhamento da laje com fôrma trapezoidal de PRFV pode ser determinada somando a contribuição da resistência do concreto com a resistência da fôrma. No somatório da resistência da fôrma utilizou-se um coeficiente de redução ( $\psi_f$ ) de 0,85, de acordo com o ACI 440.2R (2017), devendo o somatório ponderado ser menor ou igual ao cisalhamento solicitante, conforme a equação (24).

$$\phi V_n = \phi(V_c + \psi_f \cdot V_{frp}) \leq V_{cmax} \quad (24)$$

Sendo:

$V_n$  = resistência nominal ao cisalhamento da estrutura;

$V_c$  = resistência ao cisalhamento do concreto;

$V_{frp}$  = resistência ao cisalhamento do PRFV;

$V_u$  = esforço solicitante último do cisalhamento;

A resistência ao cisalhamento do concreto, expressa em Newton (N), pode ser calculada por meio da equação (25), adaptada da norma ABNT NBR 8.800 (2008).

$$V_c = \frac{63 \cdot \eta \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \cdot k \cdot A_v}{\gamma_c \cdot b_n} \quad (25)$$

Sendo:

$A_v$  = área resistente do concreto em milímetros quadrados, indicada na Figura 25;

$b_n$  = largura entre duas nervuras consecutivas, em milímetros;

$\eta = 0,3 + 0,7(\rho_c/2400)$ ;

$\rho_c$  = massa específica do concreto, não maior que 2400 kg/m<sup>3</sup>;

$k = (1,6 - d/1000) \geq 1,0$  caso haja armadura longitudinal de tração que se estenda a não menos de  $d + l_{b,sec}$  além da seção considerada e 1,0 nos outros casos.

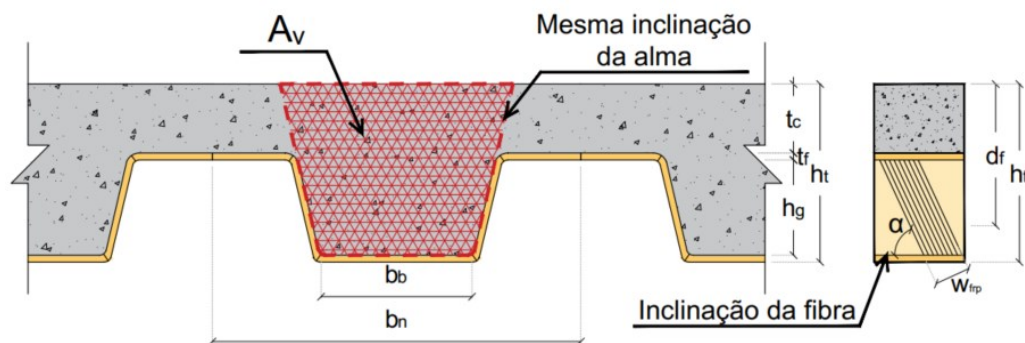


Figura 25 – Área resistente do concreto (hachurada)

O limite da força cortante, expresso em Newton e para uma largura de 1000 mm é calculado por meio da equação (26).

$$V_{cMAX} = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot A_v}{b_n} \quad (26)$$

Assumindo uma fissura crítica de cisalhamento à 45°, pode-se calcular a força cortante resistente da fôrma de PRFV por meio da equação (27), adaptada do ACI 440.2R (2017)

$$V_{frp} = 2 \cdot f_{fe,v} \cdot e \cdot w_{frp} \cdot h_g \cdot (\sen \alpha + \cos \alpha) \quad (27)$$

Sendo:

$e$  = espessura da fôrma trapezoidal de PRFV;

$w_{frp}$  = comprimento da fôrma trapezoidal de PRFV;

$h_g$  = altura da fôrma trapezoidal de PRFV;

$\alpha$  = ângulo da orientação da fibra da fôrma.

### 3.7. CÁLCULO NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

De acordo com a ABNT NBR 8.800 (2008), na fase inicial de construção a flecha gerada pelo peso da fôrma e o peso do concreto fresco não deve exceder  $L_f/180$  ou 20mm, o que for menor, sendo  $L_f$  o vão teórico da forma na direção longitudinal das nervuras.

Apesar da ABNT NBR 8.800 (2008) considerar apenas as cargas variáveis ao determinar a flecha na fase final, para o cálculo deste trabalho foram utilizados os pesos próprios do revestimento, do forro, e da sobrecarga de utilização, excluindo-se apenas o peso próprio do concreto já considerado na fase inicial da fôrma. O deslocamento vertical máximo admissível adotado foi igual a  $L_f/350$ , baseando-se no item Q.3.2.2. da ABNT NBR 8.800 (2008).

#### 3.7.1. Seção homogeneizada

Embora o Anexo Q – Lajes mistas de aço e concreto da ABNT NBR 8.800 (2008) não deixe claro quais configurações de inércia devem ser utilizadas para o cálculo do ELS, admite-se uma seção homogeneizada teórica por se tratar de dois materiais distintos, conforme é orientado no item 4.9.6.4. da norma supracitada, ajustando os valores de rigidez à flexão do elemento considerando as propriedades dos materiais de sua composição.

A primeira consideração que deve ser realizada para determinar a seção homogeneizada é estabelecer a razão modular ( $\alpha_E$ ), de acordo com a equação (28):

$$\alpha_E = \frac{E_f}{E_C} \quad (28)$$

Sendo:

$\alpha_E$  = Razão modular;

$E_C$  = Módulo de elasticidade do concreto;

$E_f$  = Módulo de elasticidade do PRFV.

O momento de inércia efetivo da seção homogeneizada foi calculado de forma simplificada, sendo utilizadas as equações apresentadas por Queiroz, Pimenta e Martins (2012) e Favarato (2021), adaptando-se os símbolos das equações para aqueles já utilizados neste trabalho e substituindo as propriedades do aço pelas propriedades do concreto, para a posição da LNE acima da fôrma permanente e para a LNE abaixo dentro da fôrma permanente, sendo descritos no item 3.7.1.1 e 3.7.1.2.

3.7.1.1. Momento de inércia da seção homogeneizada com LNE no concreto

Para determinar o momento de inércia da seção homogeneizada com a LNE na mesa/capa do concreto é preciso considerar a parcela da mesa e da fôrma, conforme parâmetros da seção genérica ilustrados na Figura 26, sendo calculado com base na equação (29):

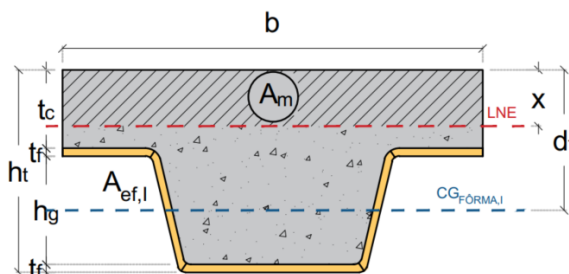


Figura 26 - Considerações da seção genérica com LNE na mesa/capa da laje

$$I_{ef} = \left[ I_m + A_m \cdot \left( \frac{x}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{I_f + A_{ef,II}(df - x)^2}{\alpha_E} \right] \quad (29)$$

Sendo:

$I_{ef}$  = Momento de inércia efetivo da seção homogeneizada da laje mista;

$I_m$  = Momento de inércia da mesa/capa de concreto, com  $x \leq t_c$ ;

$A_m$  = Área da seção transversal da mesa/capa de concreto, com  $x \leq t_c$ ;

$I_f$  = Momento de inércia da seção da fôrma de PRFV em análise.

3.7.1.2. Momento de inércia da seção homogeneizada com LNE na fôrma

Diferente do item 3.7.1.1, para determinar o momento de inércia da seção homogeneizada com a LNE na fôrma é preciso considerar a parcela da nervura, conforme parâmetros da seção genérica ilustrados na Figura 27.

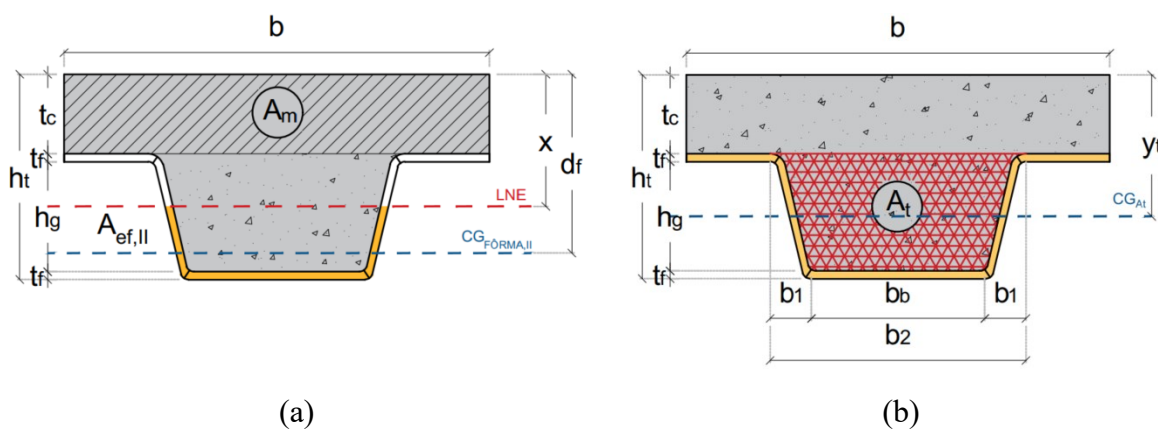


Figura 27 - Considerações da seção genérica com LNE na fôrma permanente. (a) Considerações sobre a fôrma; (b) Considerações sobre a nervura.

O cálculo do momento de inércia levou em consideração a posição da LNE como eixo principal, obtendo assim a equação (30) para a seção não fissurada:

$$I_{ef} = \left[ I_m + A_m \left( x - \frac{t_c}{2} \right)^2 \right] + [I_t + A_t (h_t - x - y_t)^2] + \left[ \frac{I_f + A_{ef,II} (df - x)^2}{\alpha_E} \right] \quad (30)$$

Sendo:

$I_t$  = Momento de inércia da nervura de concreto;

$A_t$  = Área da seção transversal da nervura de concreto;

$y_t$  = Distância entre o centro geométrico (CG) da nervura de concreto e a seção mais comprimida do elemento;

A distância do centro geométrico da nervura pode ser calculada por meio da equação (31):

$$y_t = \frac{(h_g + 2e) \cdot (3b_b + 4b_1)}{6(b_b + b_1)} \quad (31)$$

Sendo:

$b_b$  = Largura da parte inferior da nervura;

$b_1$  = Projeção da distância entre o banzo superior e inferior;

$h_g$  = Altura da nervura;

$e$  = Espessura da fôrma permanente de PRFV.

O momento de inércia homogeneizado da seção fissurada com a LNE dentro da fôrma pode ser calculado por meio da equação (32):

$$I_{ef} = \left[ I_m + A_m \left( x - \frac{t_c}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{I_f + A_{ef,II} (df - x)^2}{\alpha_E} \right] \quad (32)$$

É importante salientar a diferença da área da seção transversal da nervura ( $A_t$ ) para a área resistente do concreto ( $A_v$ ) ao cisalhamento, sendo estes parâmetros diferentes e que não devem ser confundidos.

### 3.7.2. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

Na fase inicial (durante a construção), a fôrma trapezoidal de PRFV está sujeita às cargas construtivas referente ao peso próprio da fôrma permanente de PRFV, peso próprio do concreto no estado fresco e peso dos equipamentos e operários durante a construção (sobrecarga de construção). De acordo com a ABNT NBR 8.800 (2008), o peso da fôrma permanente e o peso do concreto fresco não devem exceder  $L_f/180$  ou 20mm, o que for menor, sendo  $L_f$  o vão teórico da forma na direção das nervuras.



O deslocamento vertical da laje ( $\delta$ ) de uma laje mista com uma carga uniformemente distribuída, bi-apoiada, pode ser determinado por meio da equação (33).

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L_f^4}{E_f \cdot I_{ef}} \quad (33)$$

Sendo:

$q$  = carga uniformemente distribuída.

Já para uma laje mista, bi-apoiada, carregada com duas cargas concentradas  $P$  aplicadas à uma distância de  $1/4$  do apoio, o deslocamento vertical pode ser calculado por meio da equação (34).

$$\delta = \frac{11}{384} \cdot \frac{P \cdot L_f^3}{E_f \cdot I_{ef}} \quad (34)$$

Sendo:

$P$  = Carga concentrada aplicada à  $1/4$  do vão.

Ainda de acordo com Honickman (2008), a equação de deflexão subestima a deflexão na flexão em 18%, em virtude disso foi admitido um coeficiente de 1,18 nos valores obtidos, dessa forma, o vão efetivo máximo admissível considerando  $L_f/350$  será dado pela equação (35) para uma laje mista bi-apoiada com carga uniformemente distribuída.

$$L_{f,máx} = \sqrt[3]{\frac{192}{875 \cdot 1,18} \cdot \frac{E_f \cdot I_{ef}}{q}} \quad (35)$$

### 3.8. FLUXOGRAMA DE CÁLCULO PELO MÉTODO PROPOSTO

Com base nas equações apresentadas, a verificação da laje mista para o ELU e ELS pode ser realizada de acordo com o fluxograma proposto na Figura 28.

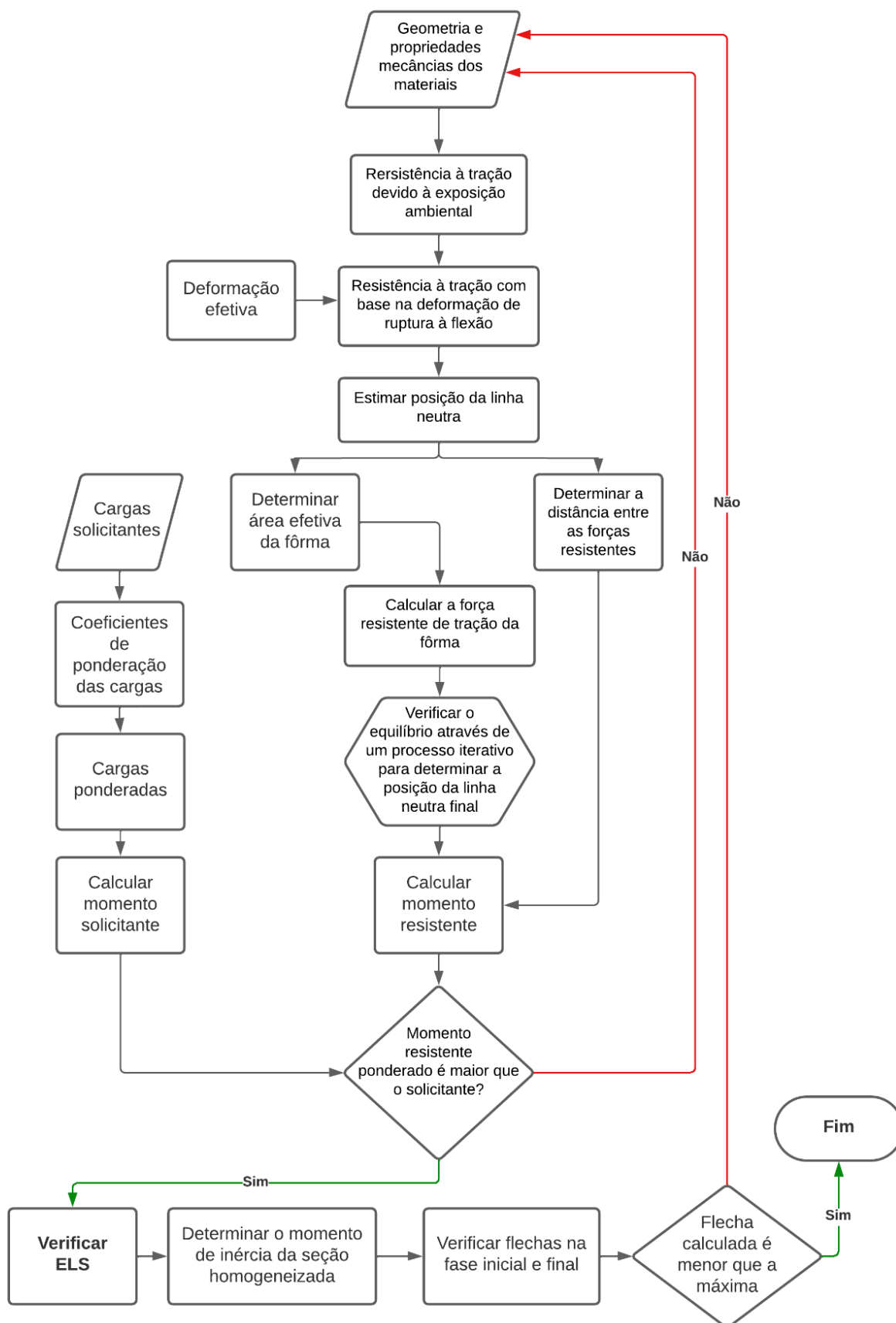


Figura 28 - Fluxograma para verificação do ELU e ELS da laje mista com fôrma permanente de PRFV

### 3.9. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE NECESSÁRIA DE FIBRAS DE VIDRO

Segundo You *et al.* (2017) a lei das misturas é o método mais utilizado para estimar a resistência à tração dos polímeros reforçados com fibras, prevendo o adequado módulo de elasticidade do compósito, baseando nas hipóteses de que a fibra e a matriz são homogêneas, linear-elásticas e não há vazios no compósito, estando a fibra e matriz perfeitamente aderidas. As estimativas de taxa de fibra e módulo de elasticidade são realizadas de acordo com a equação (36) a equação (38).

$$V_f = \frac{v_f}{v_{mc}} ; V_m = \frac{v_m}{v_{mc}} ; \text{sendo: } V_f + V_m = 1 \quad (36)$$

Sendo:

$V_f$  = taxa de fibra;

$v_{mc}$  = volume do compósito;

$v_f$  = volume de fibra;

$V_m$  = taxa de matriz;

$v_m$  = volume de matriz.

$$E_f = E_{fiber} \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (37)$$

Sendo:

$E_f$  = módulo de elasticidade de um compósito de fibras contínuas e alinhadas, na direção do alinhamento;

$E_{fiber}$  = módulo de elasticidade da fibra;

$E_m$  = módulo de elasticidade da matriz;

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f \cdot V_f}{E_m \cdot V_m} \quad (38)$$

Sendo:  $F_f$  = carga suportada pelas fibras;  $F_m$  = carga suportada pela matriz.

### 3.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as equações utilizadas para o estudo analítico deste trabalho, bem como os parâmetros analisados. Apresentou-se as principais normas consideradas para o dimensionamento, ações solicitantes, verificações no estado limite último e de serviço,

bem como uma estimativa da quantidade de fibras e polímeros utilizados para a fabricação das fôrmas permanentes. As informações apresentadas no Capítulo 3 serviram de base para a montagem do programa experimental, sendo posteriormente apresentados seus resultados no Capítulo 5 e Apêndice A.

#### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em cinco etapas principais, conforme pode ser visualizado na Figura 29.

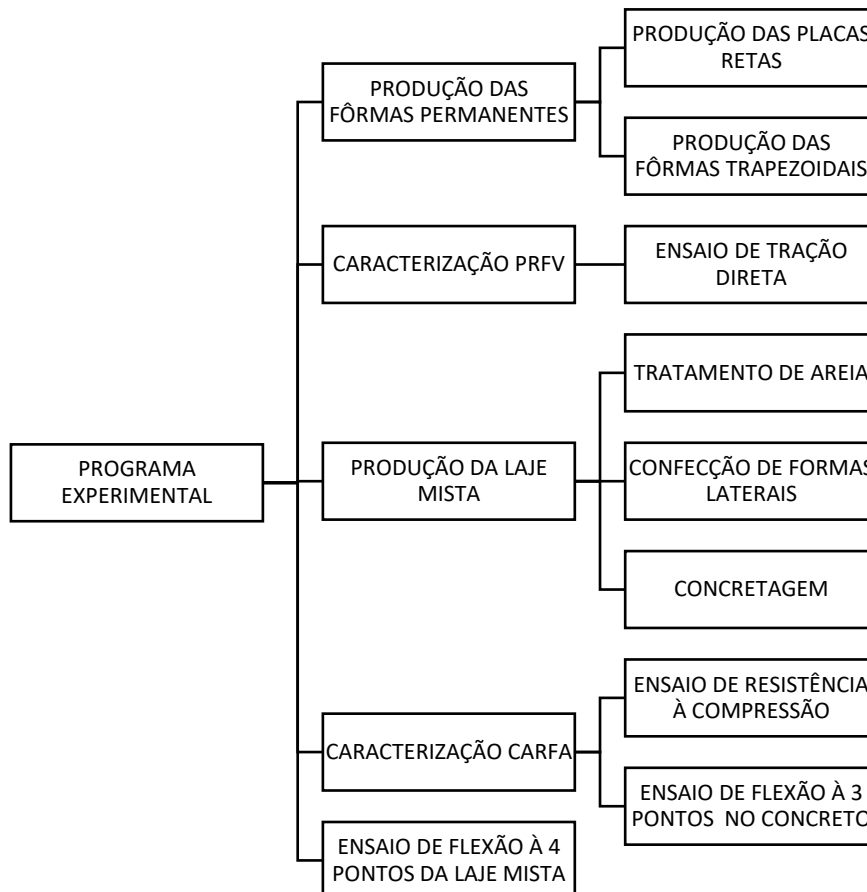


Figura 29 - Etapas da metodologia utilizada.

A primeira etapa consistiu na produção dos compósitos, particionada entre a produção inicial com placas retas e posteriormente a produção final das fôrmas trapezoidais. Na etapa subsequente caracterizou-se os compósitos produzidos aferindo suas espessuras com paquímetro digital em vários pontos do compósito e realizando o ensaio de tração direta, obtendo os valores para a resistência à tração e módulo de elasticidade dos PRFV.

Com os compósitos caracterizados procedeu-se com a terceira etapa, sendo essa a produção das lajes mistas, seguida da caracterização do CARFA e da caracterização da laje por meio do ensaio de flexão à quatro pontos na quinta etapa.

Os experimentos realizados foram conduzidos na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB), utilizando os equipamentos e maquinários disponíveis no Laboratório de Estruturas (LABEST), Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) e Laboratório de Engenharia Mecânica, localizados no Distrito Federal (DF).

Após a obtenção dos resultados procedeu-se ao tratamento e à análise dos resultados obtidos em todo o programa experimental.

#### 4.1. CORPOS DE PROVA E PARÂMETROS DE TESTES

Fundamentado nos objetivos propostos, o principal parâmetro de análise neste trabalho deu-se por meio da variação de espessura, que foi avaliada em relação à quantidade de fibras unidirecionais nos compósitos produzidos.

Foram produzidas ao todo três fôrmas permanentes variando o número de camadas de mantas com fibras longitudinais. As fôrmas possuíam 4, 6 e 8 camadas de fibras unidirecionais longas e foram designadas D4F, D6F e D8F, nesta ordem, com complemento de 2 camadas de *Chopped-Strand Mat* (CSM) em cada uma delas. A variação da gramatura das fibras na direção longitudinal levou a uma variação da espessura média do compósito produzido. As espessuras finais das fôrmas foram iguais a 2,58 mm, 4,21 mm e 5,25 mm para as fôrmas D4F, D6F e D8F, respectivamente. Por outro lado, foram definidas como variáveis controladas a dosagem do concreto, materiais constituintes, geometria da laje, vão de ensaio, camada de aderência e a taxa de aplicação de carga.

Devido a problemas técnicos enfrentados durante à execução dos ensaios, apesar de terem sido produzidas três lajes mistas, uma para cada fôrma permanente (D4F, D6F e D8F), até a conclusão desse texto não foi realizado o ensaio com a laje produzida com a fôrma D4F. Sendo assim, neste trabalho são apresentados somente os resultados com as lajes mistas D6F e D8F. Todas as lajes foram construídas com 1.900 mm de comprimento, para serem ensaiadas com um vão livre igual à 1.800 mm (Figura 30) O comprimento do vão livre de 1.800 mm foi determinado de acordo com o estudo analítico do modelo proposto, visando otimizar o comportamento de cada material.

Ao investigar diferentes concentrações de fibras unidirecionais e CSM, tem-se como objetivo identificar a influência da quantidade de fibras unidirecionais na resistência da laje mista. Esta influência pode fornecer subsídios para o projeto de estruturas mais eficientes e economicamente viáveis, levando em consideração as propriedades mecânicas e o desempenho estrutural da estrutura mista e do próprio compósito.

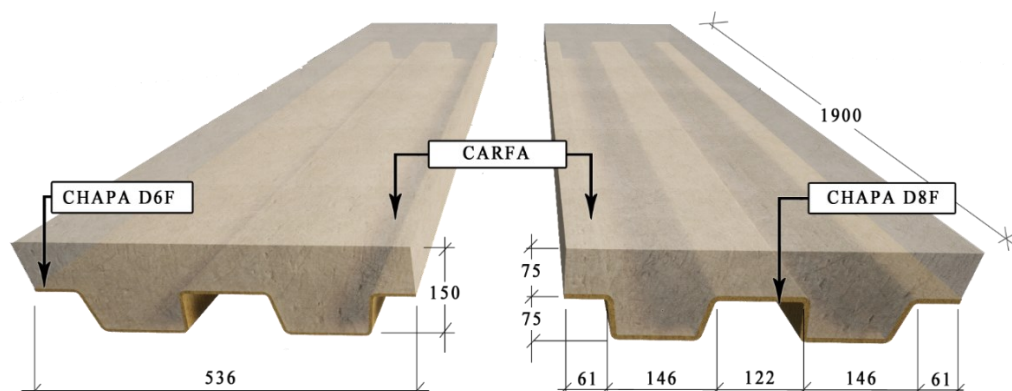


Figura 30 - Geometria das lajes ensaiadas (medidas em milímetros).

A conexão entre a fôrma permanente de PRFV e o concreto é uma configuração crítica para o funcionamento da laje mista (Zhang *et al.*, 2020). Isto posto, com o objetivo de melhorar a aderência entre a fôrma e o concreto, foi realizado um tratamento superficial inovador. Esse tratamento consistiu na aplicação direta de areia sobre a fôrma permanente, utilizando a própria resina de poliéster utilizada na produção do material compósito das fôrmas como promotor da aderência. Vale ressaltar que essa abordagem se destaca na literatura, uma vez que geralmente o revestimento de areia é produzido com o uso de adesivo epóxi. Esse método de revestimento de areia utilizando a resina de poliéster apresenta uma abordagem alternativa para promover a aderência desejada entre a fôrma e o concreto. Essa técnica pode trazer benefícios em termos de eficácia e custo, ao evitar o uso de adesivos epóxi adicionais, bem como em termos de produção, podendo ser incorporada comercialmente no processo de produção da fôrma, sem necessidade de aplicação do tratamento superficial *in loco*.

## 4.2. MATERIAIS CONSTITUINTES

### 4.2.1. Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço (CARFA)

O traço utilizado foi adaptado da pesquisa anterior feita por Cardoso (2020), realizadas na Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília.

Optou-se por utilizar um concreto reforçado com fibras de aço por ser a mais adequada para fins estruturais, sendo este tipo de fibra já utilizado em trabalhos anteriores como substituto de armaduras mínimas e de cisalhamento, como em Barros *et al.*, (2015) e Nguyen, Bui T. e Bui Q. (2022). Foi utilizada a dosagem de 1:1,16:1,56:0,46 (cimento: areia: brita: a/c) com adição de 0,6% de fibra de aço, em volume. A fibra utilizada foi uma fibra de aço com ancoragem nas extremidades, do tipo St-33/60 de 0,55 mm de diâmetro ( $d_{fa}$ ), 33 mm de comprimento ( $l_f$ ), 60 mm de fator de forma ( $l_f/d_f$ ) e resistência à tração de 1100 MPa (Figura

31). Foram adicionados concomitantemente 7,57% de filler calcário e 0,11% de aditivo superplastificante. O filler utilizado foi o Calcifico 325 da Goiás Filler, já o superplastificante utilizado foi o MasterGlenium 5, um superplastificante de terceira geração à base de policarboxilato.



Figura 31 - Fibra de aço utilizada.

#### 4.2.2. Fôrma permanente trapezoidal de PRFV

##### 4.2.2.1. Fôrma negativa

Foram confeccionadas fôrmas trapezoidais de PRFV que servem de fôrma aderida para a laje, sendo necessário complementar apenas com os fechamentos perimetrais com chapas de madeirite. A fôrma foi produzida a partir de um molde aberto do tipo “macho” de aço galvanizado #18 inspirado no modelo comercial de *steel deck* de 75 mm de altura, adaptado para a dobra no aço galvanizado conforme pode ser visto na Figura 32.

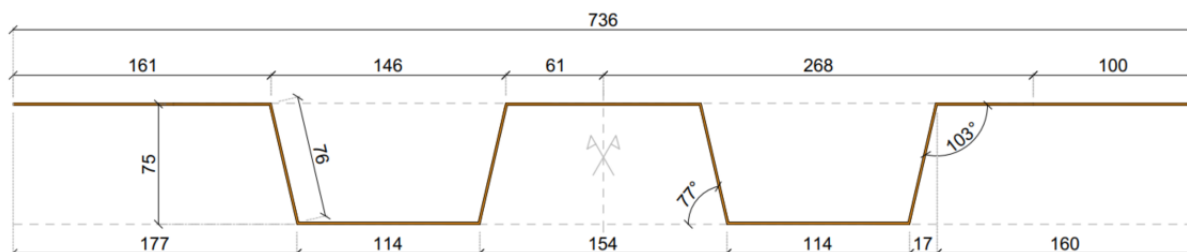


Figura 32 - Modelo de forma negativa para a infusão das fôrmas trapezoidais (medidas em milímetros).

##### 4.2.2.2. Fibras de vidro

O material utilizado na produção das fôrmas permanentes foi determinado de acordo com estudo analítico, sendo o tipo de fibra utilizado extremamente importante no desempenho do compósito.

Para a configuração longitudinal principal optou-se pela utilização de fibras de vidro unidirecionais tipo “AR” (Álcali-Resistente), com peso nominal de 700 g/m<sup>2</sup>, sendo as propriedades informadas na Tabela 3. De forma auxiliar, foram utilizadas em todos os



protótipos duas camadas fixas de fibra de vidro curta e aleatória, conhecida como CSM de densidade superficial de 450 g/m<sup>2</sup>.

Tabela 3 - Propriedades da Fibra Unidirecional (dados fornecidos pelo fabricante).

Construção	Peso (g/m <sup>2</sup> )	Tolerância	Material
0°	661	± 5%	Fibra de vidro R 2.400 TEX
90°	59	± 5%	Fibra de vidro R 2.400 TEX
Costura 1	8	± 2 g/m <sup>2</sup>	PES (Poliéster) 76dtex
Costura 2	8	± 2 g/m <sup>2</sup>	PES (Poliéster) 76dtex

#### 4.2.2.3. Resinas, catalisadores e diluentes

Para a infusão dos compósitos foi utilizada resina poliéster escura, tixotrópica, acelerada, de baixa viscosidade e compatível com fibras de vidro. Suas propriedades são informadas na Tabela 4.

O catalisador utilizado para polimerização da resina foi o MEK (*methyl ethyl ketone peroxide in dimethyl phthalate*), de reação média e uso geral com baixo teor de água ( $\leq 3,00\%$ ), com densidade de 1,14 g/cm<sup>3</sup> a 1,18 g/cm<sup>3</sup>. A concentração empregada foi de 1% com base na massa de resina utilizada.

Tabela 4 – Propriedades da Resina Poliéster Escura à 25° C (dados fornecidos pelo fabricante).

Propriedades	Unidade	Valores
Gel Time	Minutos	10 – 15
Intervalo de Pico Exotérmico	Minutos	8 – 12
Pico Exotérmico	°C	180 – 195
Viscosidade Brookfield	cP	250 – 350
Tixotropia		Min 1,3
Teor de Sólidos	%	55 – 57
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,078 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à tração	MPa	48

### 4.3. PRODUÇÃO DAS FÔRMAS PERMANENTES DE PRFV

#### 4.3.1. Partes constituintes do sistema de infusão

O sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo utilizado foi desenvolvido inicialmente por Silva (2020) e possui diversos elementos que são cruciais para garantir a qualidade do produto final. Os elementos e suas funções específicas são citados a seguir.

- **Molde negativo:** o sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo utiliza um molde negativo responsável por determinar a geometria do compósito. O molde deve ter superfície lisa e não ser reativo aos componentes do sistema de infusão, garantindo assim uma superfície adequada e segura. Para as infusões das placas retas foi utilizada uma chapa de vidro de 6 mm de espessura e para a infusão das fôrmas permanentes foi utilizado um molde de aço galvanizado #18 de  $73,6 \times 300,0$  cm.
- **Desmoldante:** utilizado no molde negativo e deve ser quimicamente compatível com os materiais de infusão. O desmoldante utilizado nesta pesquisa foi a cera à base de carnaúba.
- **Peel Ply:** também chamado de *release fabric*, é um tecido desmoldante de poliamida, utilizado para auxiliar na desforma em laminação manual e infusões à vácuo. O tecido utilizado nesta pesquisa é fabricado por meio do fio Nylon 66, com peso total de  $88 \text{ g/m}^2$  e espessura de 0,152 mm.
- **Flow media:** também chamado de *air flow*, é tela para infusão utilizada para equilibrar e distribuir o fluxo de resina durante a infusão, podendo ser utilizado em toda a área do compósito ou em pontos específicos para auxiliar na velocidade do fluxo da resina. A tela utilizada nas infusões é feita de fibras de polipropileno com uma gramatura de  $180 \text{ g/m}^2$  e espessura de 1,21 mm.
- **Filme de vácuo:** também chamado de saco de infusão ou plástico para vácuo, este material é utilizado na instalação da bolsa de vácuo, devendo ser resistente o suficiente para resistir à pressão de vácuo e à micro perfurações dos elementos do sistema, como por exemplo as fibras utilizadas. O plástico para vácuo utilizado é de poliolefina multicamada, com limite de deformação de 350%, espessura de 75  $\mu\text{m}$  e temperatura máxima de uso de 121 °C.
- **Spiraduto:** tubo em espiral que auxilia na condução inicial da resina e da sucção de ar em toda a peça, utilizado para a distribuição de acordo com a geometria desejada. Diferente da maioria dos materiais de infusão, após a remoção do tubo em espiral do compósito, o mesmo pode ser reutilizado caso não haja danos na geometria. O Spiraduto utilizado nas infusões possui diâmetro nominal de 1/2".
- **Tacky tape:** também chamada de fita de vedação, é uma fita de  $3 \times 12$  mm à base de borracha butílica de alta adesividade utilizada para fixar o filme de vácuo e vedar aberturas nas conexões ou vazamentos.

- **Manômetro:** utilizado para medir a pressão em no mínimo dois pontos, sendo o primeiro para medir a pressão de saída da bomba e o segundo para medir a pressão do reservatório de vácuo (quando a interligação estiver fechada) e do sistema por completo (quando a interligação estiver aberta). Ambos os manômetros devem estar com os mesmos valores durante a infusão.
- **Mangueira:** utilizada para transportar a resina a bolsa de vácuo e para a aplicação do vácuo em si. A mangueira deve ser reforçada para garantir que não haja estrangulamento da seção devido a pressão negativa gerada pelo vácuo. Nas infusões desta pesquisa foi utilizada mangueira do tipo crista de 1/2” reforçada, com espessura das paredes internas de 3 mm, própria para a infusão de resina com auxílio do vácuo.
- **Conexões:** no sistema é necessário conexões que possibilitem a interligação da mangueira com o spiraduto, mangueira com a bomba e com o recipiente da resina. Para as conexões convencionais optou-se pela utilização de “T” de 1/2” e para o fechamento do sistema utilizou-se registros esfera de 1/2”, ambos de policloreto de vinila (PVC).
- **Bomba à vácuo:** Bomba à vácuo com motor e potência de 1 HP, medindo 39 cm × 14 cm × 25 cm, peso bruto de 15,45kg com vazão de 12 CFM, vácuo mínimo de  $3 \times 10^{-1}$  Pa e medidas de conexão 1/4” e 3/8”. O modelo utilizado foi o GBv12201A-AzBiv da marca Gallant.
- **Recipiente para resina:** local que será misturado os produtos químicos, devendo ser resistente e quimicamente estável. Para as placas retas foi utilizado um béquer de 1.000 ml e para a fôrma trapezoidal foi utilizado um balde de 11.000 ml.
- **Reservatório de vácuo:** item de segurança do sistema necessário para conter a resina caso haja remoção de excesso por meio do vácuo, garantindo que não vá para o sistema da bomba e danifique o equipamento. O reservatório utilizado é o mesmo montado por Silva (2020), composto por tubos de PVC de 100 mm de diâmetro com conexões em “T”, CAP para a vedação e flanges coladas com cola para PVC e vedadas externamente com *tacky tape*.

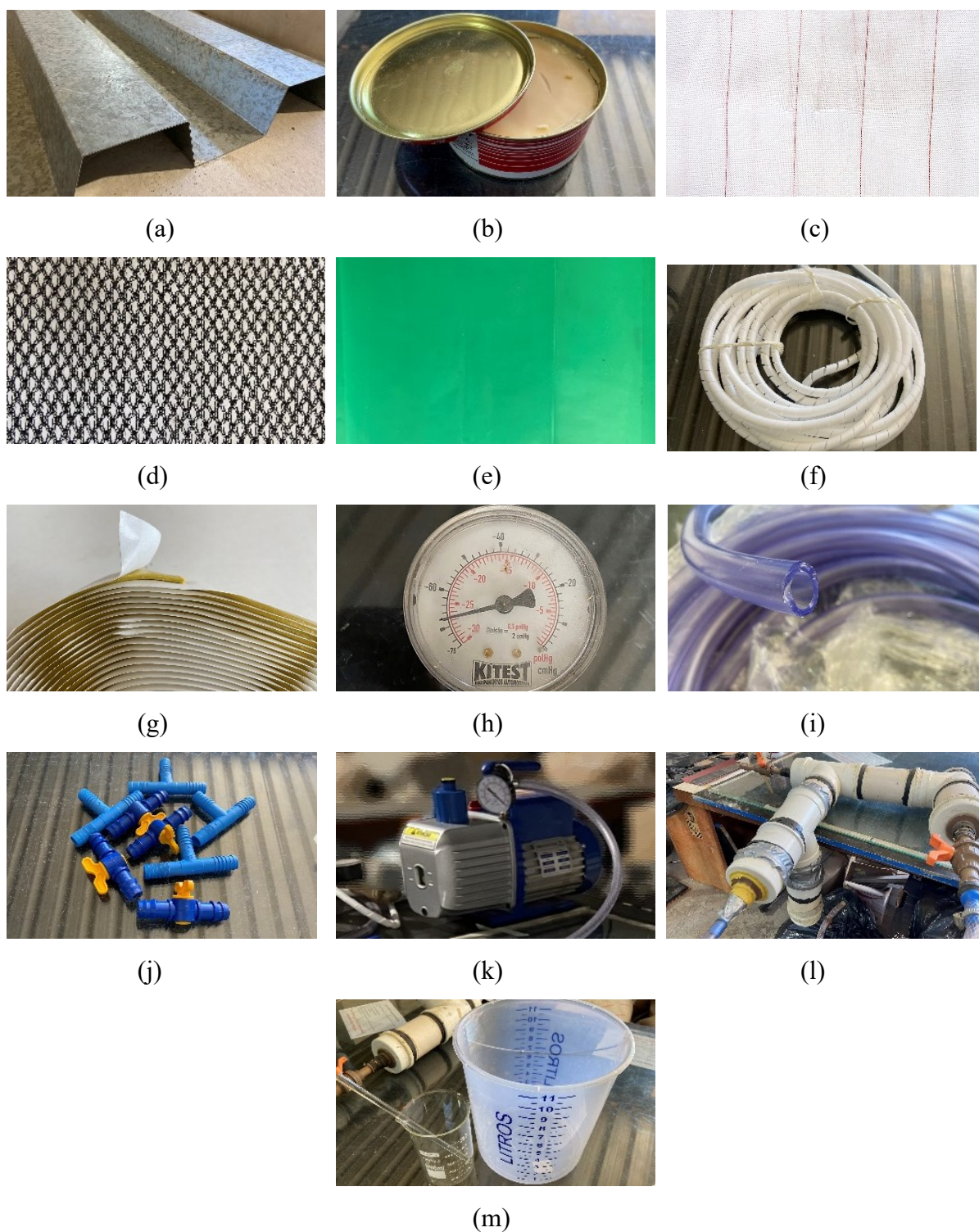


Figura 33 - Partes do sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo. (a) molde negativo; (b) cera carnaúba; (c) *peel ply*; (d) *flow media*; (e) plástico de vácuo; (f) spiraduto; (g) *tacky tape*; (h) manômetro; (i) mangueira; (j) conexões; (k) bomba à vácuo; (l) reservatório de vácuo; (m) reservatório de resina.

#### 4.3.2. Montagem do sistema de infusão de resina com auxílio do vácuo

A fabricação das fôrmas foi realizada por meio da infusão de resina com auxílio do vácuo, por meio da adaptação de um sistema produzido por Silva (2020), no Laboratório de Estruturas (LABEST).

Por meio dessa técnica, a fibra de vidro seca é posicionada em camadas em cima do molde negativo, que dará a geometria da peça. Uma camada drenante é colocada acima da fibra, seguida do plástico de vácuo. Ao montar a bolsa de vácuo, o ar é retirado e a resina escoou pelo sistema saturando as fibras, com qualquer excedente depositado no reservatório de vácuo.

Após a confecção dos materiais laminados é aguardada a cura da resina durante um período mínimo de 24 horas ou no período recomendado pelo fabricante, caso superior.

Ao todo foram utilizadas três configurações de infusão. A primeira configuração pode ser vista por meio da Figura 34, a qual foram executadas as primeiras fôrmas de PRFV. Durante a produção da fôrma foi verificado um acúmulo de resina na conexão de entrada do compósito e um fluxo de baixa velocidade até o ponto de saída, na região de vácuo. Tal configuração resultou em fôrmas parcialmente infundidas, com fibras não-saturadas. Após uma análise do sistema foi possível verificar que o funil utilizado para a alimentação de resina estava inadequado, deixando uma abertura à atmosfera não desejável ao sistema durante a alimentação, diminuindo a eficiência do vácuo e posicionada acima da peça, causando um acúmulo na região do compósito devido à indução do fluxo por gravidade.

A segunda configuração pode ser vista na Figura 35, a qual o funil para a alimentação de resina foi removido e utilizado um reservatório para resina. Para a infusão das fôrmas retas foi utilizado um béquer de 1.000 ml de vidro, posicionado abaixo do nível de infusão. Com a nova configuração o sistema à vácuo mostrou-se eficiente e sem variação de pressão ou acúmulos de resina na placa.

A terceira configuração de infusão foi montada para que fosse possível infundir a fôrma trapezoidal de 1,90 metros (Figura 36). Devido à sua extensão foi necessário adicionar seis pontos de alimentação de resina na peça, dois para cada alinhamento mostrado na Figura 36, obedecendo a uma quantidade máxima de 2 kg de resina por conexão. Para auxiliar no fluxo foram utilizadas duas saídas de vácuo, fazendo com que a resina fluísse para dois sentidos opostos na placa.

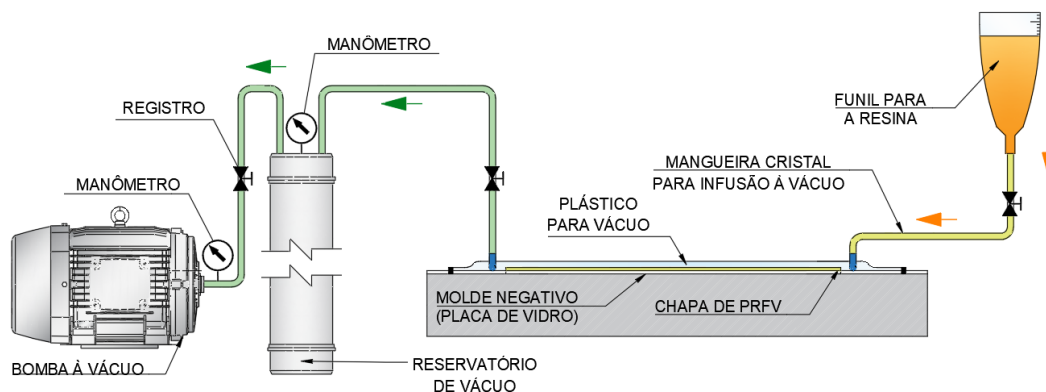


Figura 34 - Processo de fabricação placas retas de PRFV - Configuração 1.

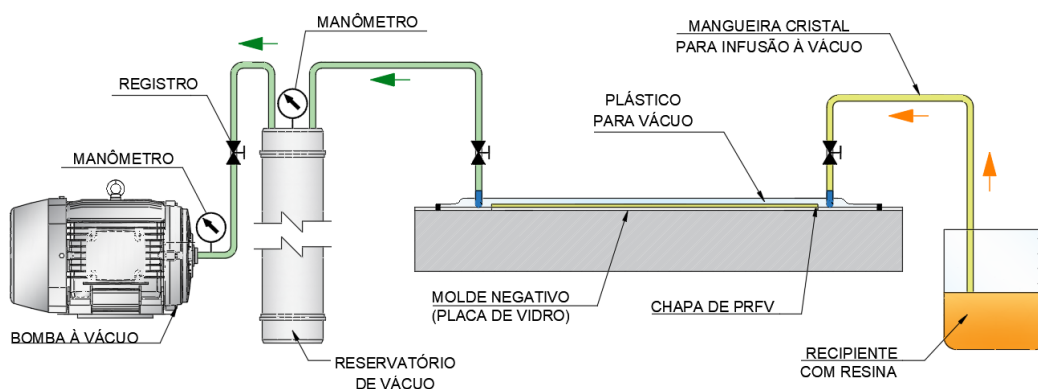


Figura 35 - Processo de fabricação placas retas de PRFV - Configuração 2

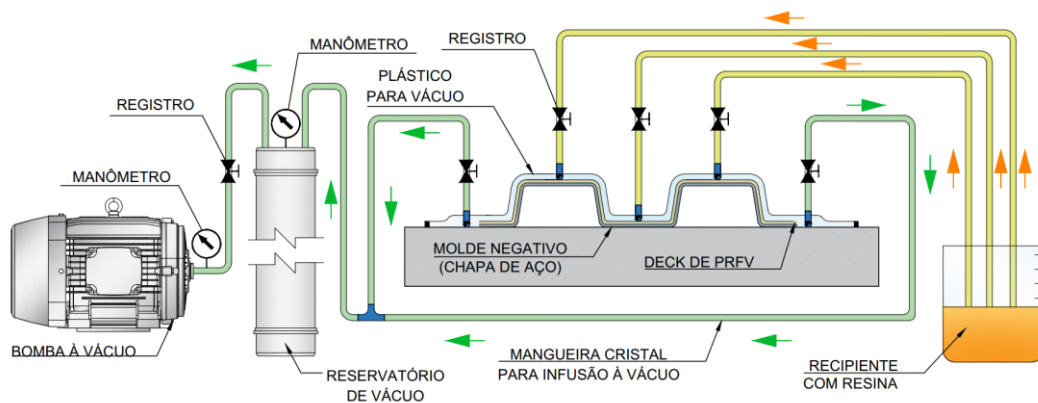


Figura 36 – Processo de fabricação das fôrmas trapezoidais de PRFV. – Configuração 3

### 4.3.3. Produção dos compósitos de PRFV

Inicialmente, procedeu-se à fabricação das placas retas, utilizando as configurações de infusão 1 e 2. No total, foram conduzidas 10 infusões de placas retas, visando analisar o processo de fabricação e a caracterização dos materiais produzidos. A sequência definida de montagem das fibras seguiu o esquema ilustrado na Figura 37, o qual manteve-se fixa a

proporção central das fibras, variando as camadas externas dentre 1 a 3 camadas de fibras longas e unidirecionais.

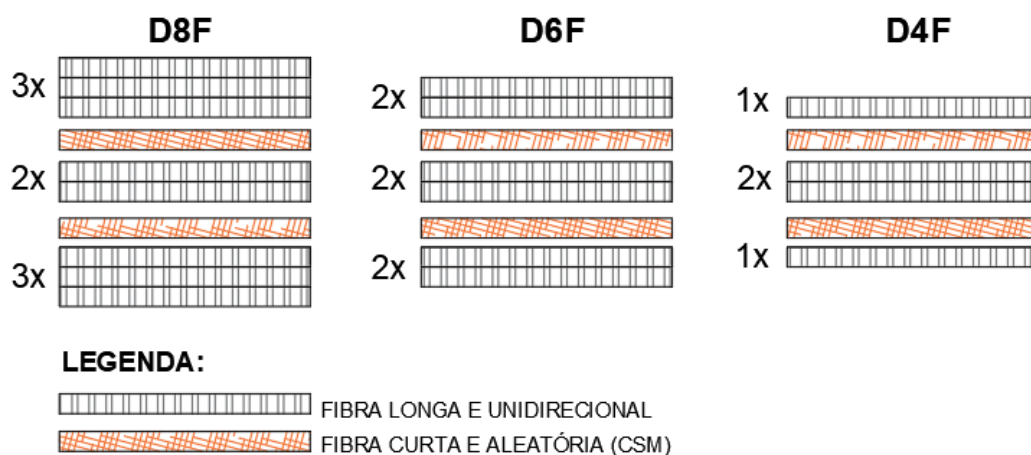


Figura 37 - Distribuição das fibras nos tipos de fôrmas produzidas.

O processo de fabricação seguiu a ordem demonstrada na Figura 38. Primeiramente os tecidos foram demarcados utilizando uma caneta permanente, régua de aço, trena e esquadro (Figura 38a). Após a marcação dos tecidos foram feitos os cortes com estilete profissional e tesoura, conforme pode ser visto na Figura 38b. Com o molde limpo, é demarcado o tamanho e posição do compósito, com uma folga de 5 centímetros para cada lado, e aplicadas três camadas de cera de carnaúba, com 30 minutos entre camadas (Figura 38c).

Respeitado o tempo de cura, são posicionados os tecidos na seguinte ordem: *peel ply* (Figura 38d), conjunto de fibras unidirecionais variando de 1 a 3 unidades, fibra CSM, conjunto de 2 fibras unidirecionais, fibra CSM, conjunto de fibras unidirecionais variando de 1 a 4 unidades (Figura 38e), *peel ply* (Figura 38 f), *flow media* (Figura 38 g), e plástico para vácuo.

Após o posicionamento do tecido é feita uma nova limpeza ao redor do molde para certificar que não há pedaços de fios ou quaisquer sujidades e aplicado o *tacky tape* ao redor do molde, com um afastamento de 10 centímetros da medida inicial do compósito. Os spiradutos são colocados em cada extremidade entre as duas camadas de *peel ply*, instaladas as conexões em “T” e com todos os materiais posicionados é iniciado o processo de fechamento de bolsa de vácuo.

Para as placas retas a bolsa de vácuo foi fechada primeiramente em duas laterais paralelas e posteriormente foram fechadas aos poucos as duas laterais perpendiculares, perfurando as entradas das conexões em “T” e deixando uma dobra adicional de plástico para garantir a perfeita acomodação da bolsa de vácuo. O planejamento do local da dobra é extremamente importante para garantir o funcionamento do sistema, pois sem o mesmo o

plástico pode não moldar adequadamente no compósito, podendo gerar problemas de estanqueidade ou até mesmo de pontos sem resina, também chamados de “*dry spots*”.

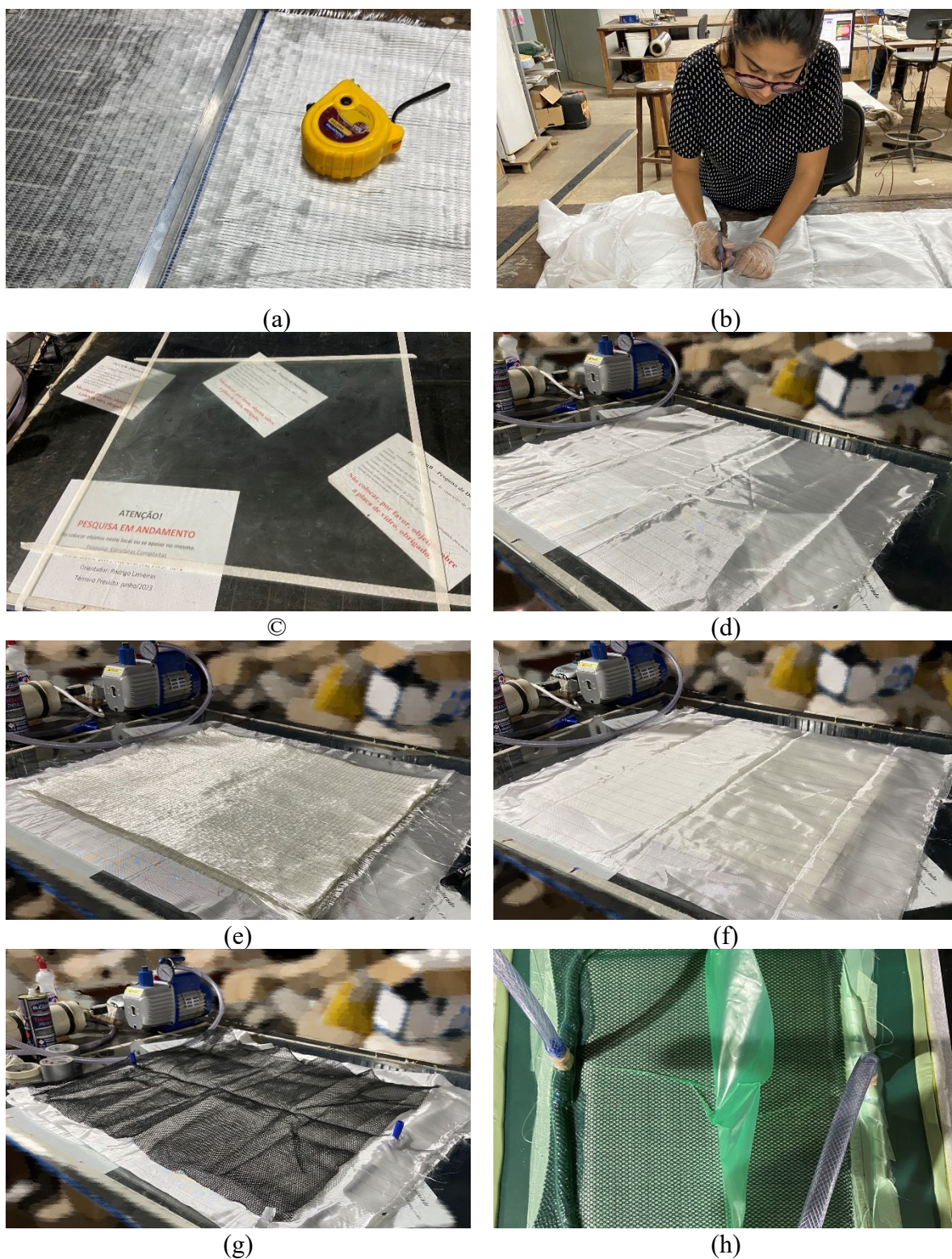


Figura 38 – Fabricação das placas planas. (a) demarcação dos pontos de corte; (b) corte dos materiais; (c) aplicação de cera desmoldante; (d) primeira camada de *peel ply*; (e) camadas de fibra de vidro; (f) última camada de *peel ply*; (g) *flow media*; (h) montagem final para infusão.



Em seguida ao fechamento completo da bolsa de vácuo são instaladas as mangueiras de alimentação nas conexões. Por serem pontos de fragilidade, tanto a abertura do plástico de vácuo, quanto a conexão final da mangueira, são vedadas com *tacky tape*. Com as mangueiras instaladas e os registros posicionados em cada rede é realizado o primeiro teste de vácuo (Figura 38h), no qual é observada a pressão medida nos dois manômetros e possíveis vazamentos no sistema.

Ao verificar a estanqueidade do sistema inicia-se o processo de pesagem dos materiais para a infusão, em uma balança de precisão. Para cada 1 g de fibra de vidro foi utilizado 1 g de resina poliéster, 0,1 g de monômero de estireno e 0,001 g de catalisador MEK. Os produtos foram pesados separadamente, juntando primeiramente a resina e o monômero de estireno, misturando até obter uma solução homogênea e posteriormente colocado o catalisador. Com um auxílio de um cronômetro iniciou-se a contagem do tempo para a infusão, posicionamento do reservatório de resina e ligação do sistema. Em todas as produções a bomba foi mantida ligada por um período de uma hora após a catálise da reação.

Decorrida uma hora após a catalisação, os registros da bolsa de vácuo foram fechados, a bomba foi desligada aguardou-se uma cura mínima de 24 horas. Após esse período foi realizada a remoção do plástico de vácuo, conexões e mangueiras e desmoldado o compósito.

Após a fabricação e caracterização das placas retas, foi realizado um teste de fluxo com um protótipo de infusão para as fôrmas trapezoidais (Figura 39a). Neste protótipo, foram testadas três linhas de alimentação de resina e duas linhas de vácuo, bem como a execução da infusão com e sem o uso *peel ply* na parte inferior. O posicionamento das redes de alimentação mostrou-se eficiente para a geometria; no entanto, como pode ser observado na Figura 39 b, foi constatada uma área sem resina na região em que o *peel ply* não foi utilizado. Isso demonstra que o *peel ply* funcionar como tecido desmoldante e auxilia na dispersão da resina na área inferior do molde.

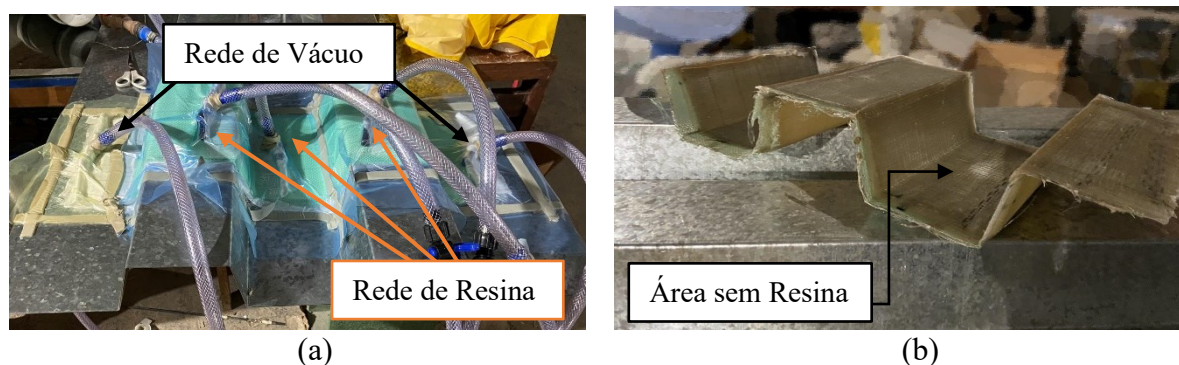


Figura 39 - Protótipo da fôrma trapezoidal. (a) esquema de infusão. (b) peça infundida

Após a aprovação das redes de alimentação, foi iniciada a montagem do sistema de infusão das fôrmas trapezoidais, conforme a Figura 40.

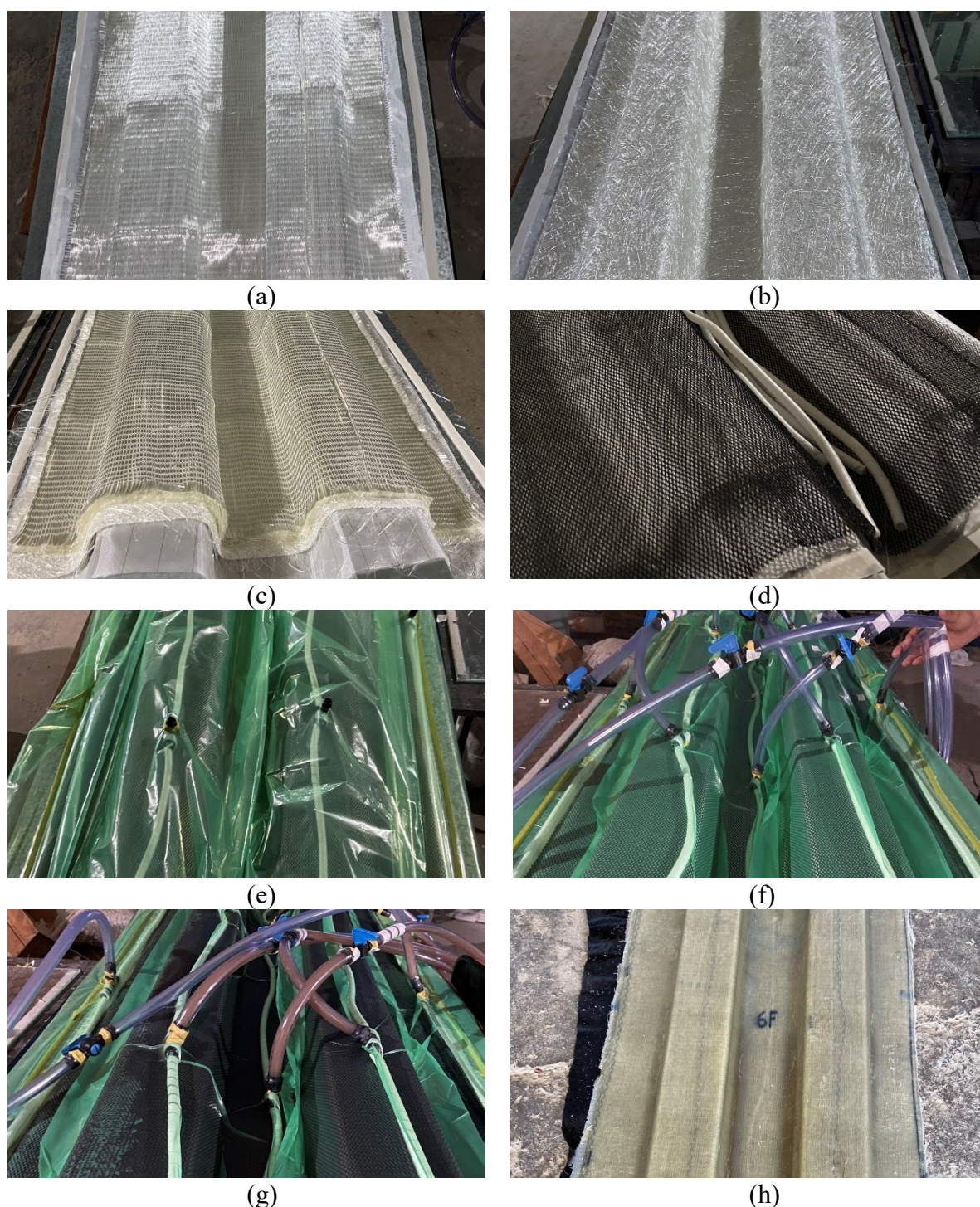


Figura 40 – Etapas de fabricação das fôrmas de PRFV. (a) posicionamento da fibra de vidro unidirecional 700g; (b) posicionamento da fibra de vidro CSM; (c) visualização total de todas as camadas de fibra; (d) posicionamento do *flow media*; (e) posicionamento do plástico para vácuo; (f) visualização do saco de vácuo com pressão aplicada; (g) visualização saco de vácuo após a infusão; (h) visualização da fôrma trapezoidal após o desmolde.

O preparo e montagem dos tecidos seguiram o mesmo procedimento das placas retas (Figura 40), com exceção do posicionamento da fibra CSM. Para garantir a geometria da peça,

em algumas extremidades, foi necessário utilizar um spray de cola de contato, aplicando apenas uma pequena camada para evitar impermeabilização da fibra no local de aplicação.

Foram instaladas três linhas de alimentação de resina paralelas entre si, com dois pontos de aplicação em cada uma. As linhas de vácuo foram instaladas nas duas extremidades longitudinais do molde, com um ponto de alimentação em cada linha. O fechamento e teste da bolsa de vácuo seguiram os mesmos procedimentos das placas retas.

O processo de infusão de resina com auxílio do vácuo foi iniciado imediatamente após a catalisação da resina, ligando apenas a rede interna e inferior da fôrma. As duas redes externas só foram ligadas após o fluxo de resina chegar nos *spiradutos* superiores, garantindo que toda a área inferior estivesse saturada. Após a finalização do fluxo de alimentação de resina, todos os registros foram fechados e a bomba permaneceu ligada por uma hora após a catalisação. A peça foi desmoldada após a cura mínima de 24 horas.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Posteriormente à cura, os compósitos foram caracterizados mecanicamente, extraindo cinco corpos de prova aleatórios de 25 cm × 1,5 cm, com direção de 0° e 90°, para a determinação da tensão última à tração. Os corpos de prova foram demarcados com o auxílio de um esquadro, régua e caneta permanente e o corte foi realizado utilizando uma serra mármore profissional com disco diamantado, conforme apresentado na Figura 41a. Ao total foram retirados 30 corpos de prova para ensaios de tração diretas, identificados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Nomenclatura dos corpos de prova ensaiados

Lote	N°	Direção	Nomenclatura
4 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	0°	V01-4F-N a V05-4F-N
4 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	90°	V01-4F-P a V05-4F-P
6 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	0°	V01-6F-N a V05-6F-N
6 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	90°	V01-6F-P a V05-6F-P
8 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	0°	V01-8F-N a V05-8F-N
8 Fibras Unidirecionais + 2 CSM	V01 a V05	90°	V01-8F-P a V05-8F-P

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, de acordo com a norma ASTM 3039M – *Tensile Testing of Polymer Matrix Composites* (ASTM, 2017). Para evitar danos causados pelas garras das prensas, as extremidades das amostras foram reforçadas com chapas de aço, utilizando cola instantânea nos

corpos de prova de 4F-N, 4F-P, 6F-N, 6F-P e 8F-P e cola à base de epóxi nos corpos de prova 8F-N (Figura 41b).

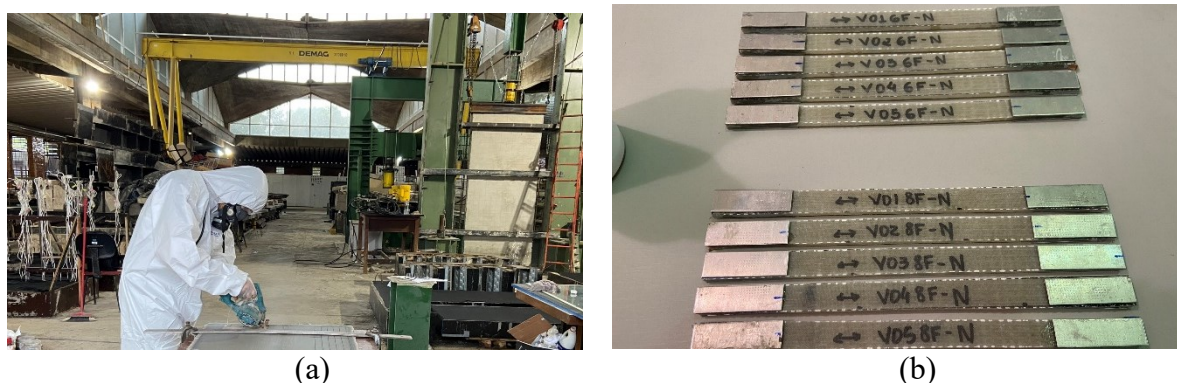


Figura 41 - Preparo dos corpos de prova para ensaio de tração direta. (a) corte na serra mármore; (b) modelo utilizado para ensaio;

Os ensaios foram conduzidos utilizando a prensa “810 *Material Test System*” da marca MTS (Figura 42 a) com uma célula de carga com capacidade de 100 kN, modelo 647.10A. Os corpos de prova foram fixados em suas extremidades com um sistema de pressão à ar comprimido e submetidos à um esforço de tração com velocidade de 2 mm/min. O deslocamento axial foi aferido por meio do extensômetro 634.11F-24 até cerca de 0,5% de sua deformação devido ao comportamento frágil do material. Sendo o compósito linear elástico até a ruptura, utilizou-se de uma progressão linear para a estimativa do módulo de elasticidade.

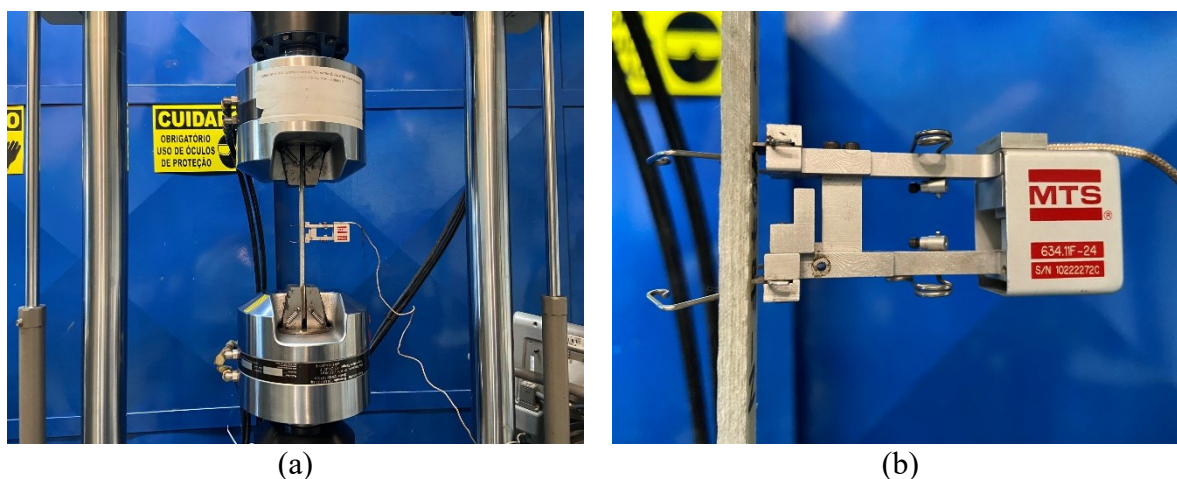


Figura 42 - Ensaio de Tração direta realizados na MTS. (a) prensa utilizada; (b) extensômetro utilizado.

As leituras de força, deslocamento e deformação foram realizadas por meio do *software Station Management*, sistema de aquisição de dados próprio da prensa e o controlador *Test Star 2*.

#### 4.5. PRODUÇÃO DA LAJE MISTA DE CARFA E PRFV

##### 4.5.1. Confeção dos modelos representativos

Após confeccionados, as fôrmas trapezoidais foram limpas e tratadas com uma nova camada de resina sem diluente, o qual foi aplicada areia em sua superfície dentro do seu período de *pot life* por meio do peneiramento com uma peneira de malha 10 e abertura de 2,18 mm (Figura 43a). Tal tratamento visou otimizar o desempenho da ligação entre o concreto e a fôrma de PRFV.

Decorrido o período de cura da resina, todo o excesso de areia da fôrma foi removido com o auxílio de uma vassoura de cerdas de plástico, de modo que não houvessem partículas soltas na peça.

As fôrmas dos modelos representativos foram confeccionadas com madeirite plastificado de 13 mm em suas faces e apoios para a fôrma na parte inferior de caibros  $5 \times 5$  cm. Conforme pode ser visto na Figura 43b foram utilizados enrijecedores nas laterais para garantir a geometria do elemento estrutural.



Figura 43 - Tratamento na superfície do compósito e fôrma utilizada. (a) diferença entre superfície normal  $\times$  tratada; (b) fôrmas executadas;

A concretagem dos corpos de prova foi realizada manualmente com betoneira mecânica com capacidade de 400 litros, sendo realizadas em duas betonadas e produzidos três corpos de prova por espécime concretado.



(a)

(b)

Figura 44 – Concreto dos Corpos de prova de lajes mistas. (a) no dia da concretagem; (b) após a desforma.

#### 4.6. CARACTERIZAÇÃO DO CARFA

A avaliação do concreto no estado fresco foi realizada por meio da verificação da consistência pelo espalhamento do concreto, normatizada pela ABNT NBR 15.823-2 (2017). A cura dos corpos de prova foi realizada por meio da aspersão de água e aplicação de manta geotêxtil para criar um ambiente úmido para o concreto durante um período de 7 dias.

A avaliação do concreto no estado endurecido foi realizada após 28 dias, por meio do ensaio de resistência à compressão (Figura 45a) normatizado pela ABNT NBR 5.739 (2018), com corpos de prova cilíndricos medindo 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. A formação de exemplares obedeceu a quantidade mínima de 3 corpos de prova a 25 m<sup>3</sup>, sendo moldados no mínimo 2 corpos de prova por laje.

O comportamento de tração na flexão do concreto (Figura 45b), bem como sua resistência residual, foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16.940 (2021), utilizando três corpos de prova de 600 mm × 150 mm × 150 mm. Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa hidráulica EMIC, com um controle de deslocamento de 0,1 mm/min.

Após a desforma e cura dos corpos de prova, os mesmos foram rotacionados conforme orienta a ABNT NBR 16.940 (2021) em relação ao sentido do molde e realizado um entalhe de 25 mm no centro longitudinal da sua face inferior, utilizando uma serra marmore e disco diamantado. O *setup* do ensaio é mostrado na Figura 46, com uma aplicação central de carga na parte superior por meio de um cutelo, com o corpo de prova simplesmente apoiado em um vão livre de 500 mm. Além da célula de carga da prensa, foi utilizada uma célula de carga externa da marca KRATOS, com capacidade de carga de 500 kN, para correlacionar os resultados aos dois *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) utilizados para medir a abertura da fissura durante a aplicação de carga.

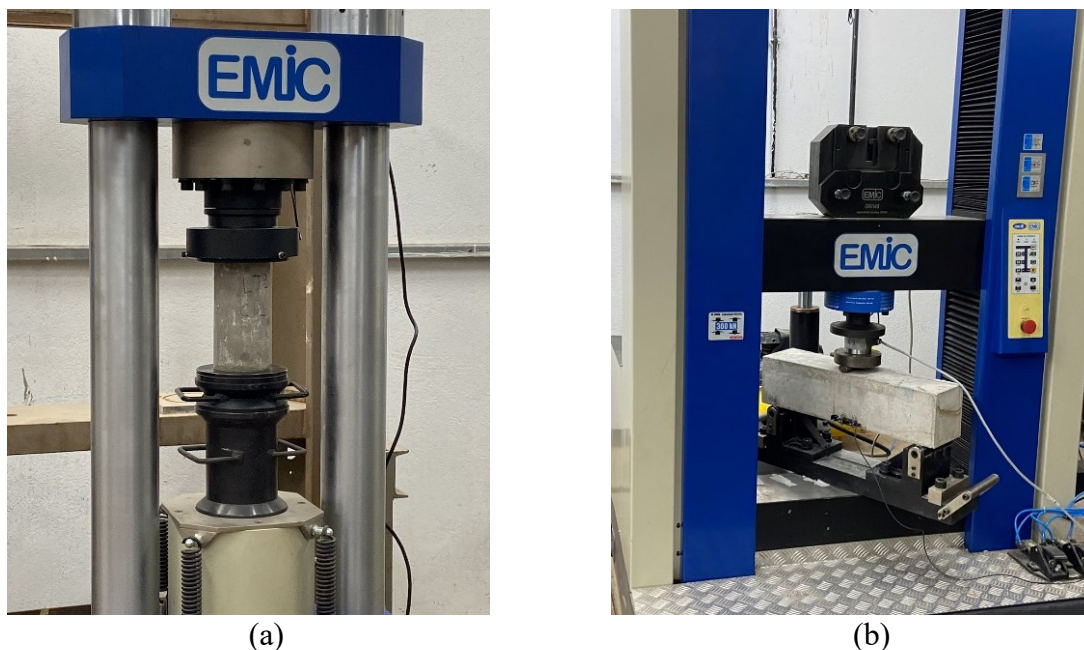


Figura 45 - Ensaio de caracterização do concreto endurecido. (a) ensaio de compressão axial; (b) ensaio de flexão à três pontos.

A aquisição dos dados foi realizada por meio o sistema de aquisição *Spider 8*, fabricado pela *HBM Test and Measurement*. Os dados adquiridos foram processados e armazenados por meio do software *Catman Data Acquisition*, possibilitando a leitura contínua da força aplicada e deslocamentos dos corpos de prova.

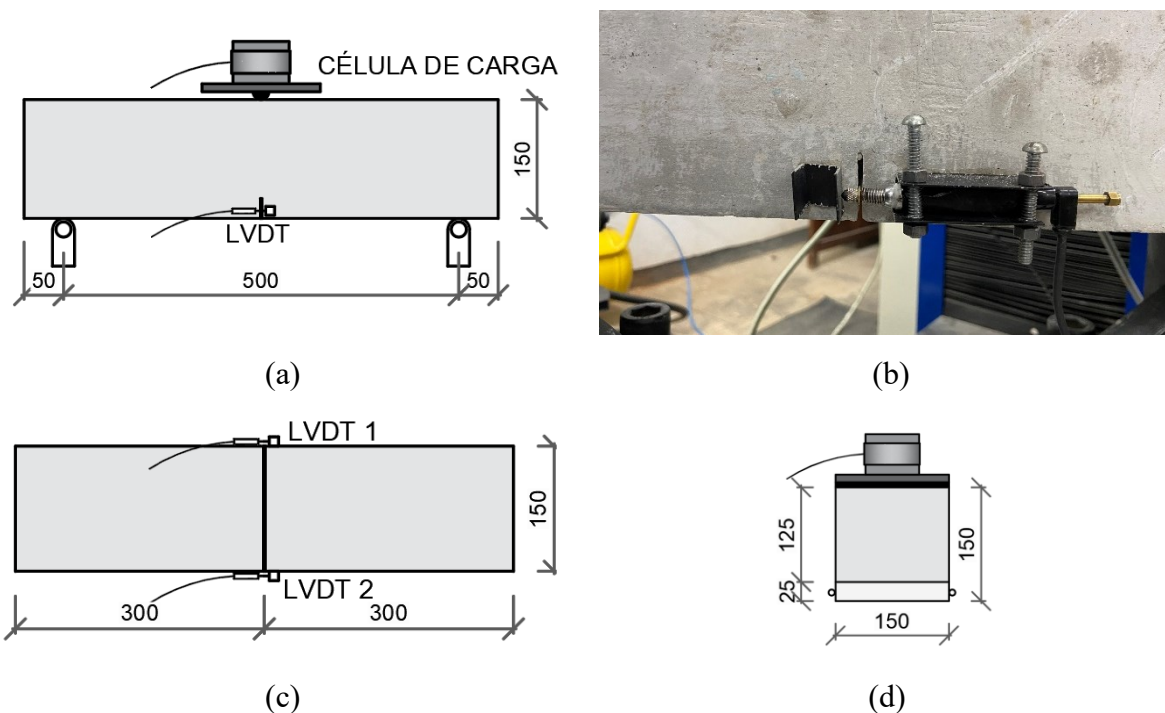


Figura 46 - *Setup* ensaio de flexão a 3 pontos, medidas em mm. (a) Vista frontal; (b) detalhe da instrumentação; (c) vista inferior do *setup*; (d) vista lateral.

Por meio das medidas obtidas com os LVDTs de abertura da fissura dos corpos de prova é realizado o tratamento de dados e obtido a curva Carga  $\times$  CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*), o qual são retiradas as resistências residuais  $f_{R,1}$ ,  $f_{R,2}$ ,  $f_{R,3}$  e  $f_{R,4}$  para CMODs iguais a 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm, respectivamente, junto ao limite de proporcionalidade  $F_L$ , para um CMOD de 0,05 mm.

A resistência à tração residual  $f_{R,i}$  e o limite de proporcionalidade  $F_L$  são obtidos pela mesma equação, variando a força em relação ao CMOD, sendo esta:

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_i \cdot l}{(2 \cdot b \cdot h_{SP}^2)} \quad (39)$$

Onde:

$F_i$  = força correspondente ao CMOD analisado;

$l$  = vão de ensaio do espécime;

$b$  = largura do espécime;

$h_{SP}$  = distância entre a face superior do espécime para o início do entalhe.

#### 4.7. ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS DA LAJE MISTA

As lajes mistas foram ensaiadas no laboratório da LABEST à flexão a quatro pontos com carregamento de curta duração contínuo até a ruptura do material após os 28 dias de idade do concreto. O ensaio de flexão a quatro pontos foi realizado com carga estática com a laje em condição de simplesmente apoiada com passos de carga médios de 0,03 kN/s, com duas forças concentradas situadas nos quartos de vão a  $L_f/4$  dos apoios. A força foi aplicada de cima para baixo por meio do atuador hidráulico da ENERPAC fixado em um pórtico metálico apropriado na laje de reação do laboratório, sendo transferida para a laje por meio de uma viga de distribuição  $W150 \times 18$  e duas vigas de perfil “I” duplo no padrão americano de  $102 \times 11,4$ , montadas em suportes de 1ª e 2ª ordem em oposição aos suportes da laje e uma camada de Neoprene, como pode ser visualizado na Figura 47, com as posições e medidas detalhadas na Figura 48. Para melhor acomodação do espécime no apoio foi necessário aplicar uma camada de regularização com massa plástica na superfície inferior da fôrma permanente.

A força aplicada foi monitorada utilizando uma célula de carga da marca KRATOS com capacidade de força de 500 kN, sendo a aquisição de dados realizada por meio o sistema de aquisição Spider 8. Os dados adquiridos foram processados e armazenados por meio do software *Catman Data Acquisition*, com frequência de gravação de 1 Hz, equivalente a uma leitura por segundo. Após o ensaio os dados foram tratados e foi adicionado o peso próprio da



laje e do *setup* para a capacidade de força final de cada espécime, uma vez que a laje foi concretada totalmente escorada.

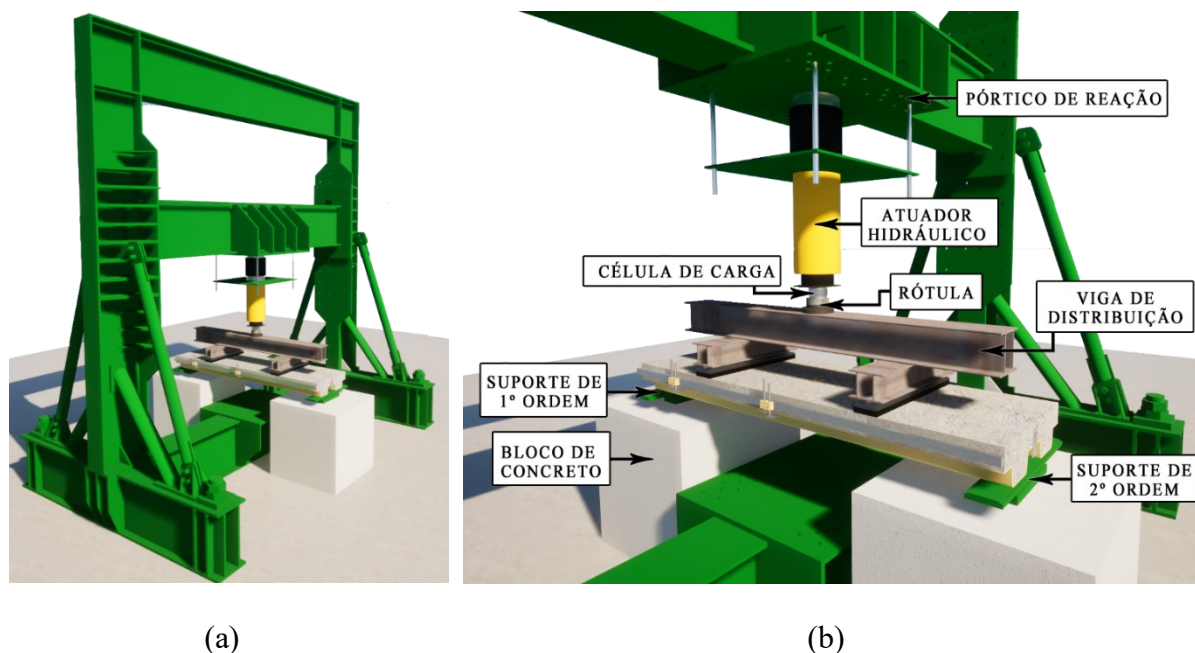


Figura 47 - Sistema geral ensaio de flexão a quatro pontos. (a) Vista 3D; (b) Detalhes gerais.

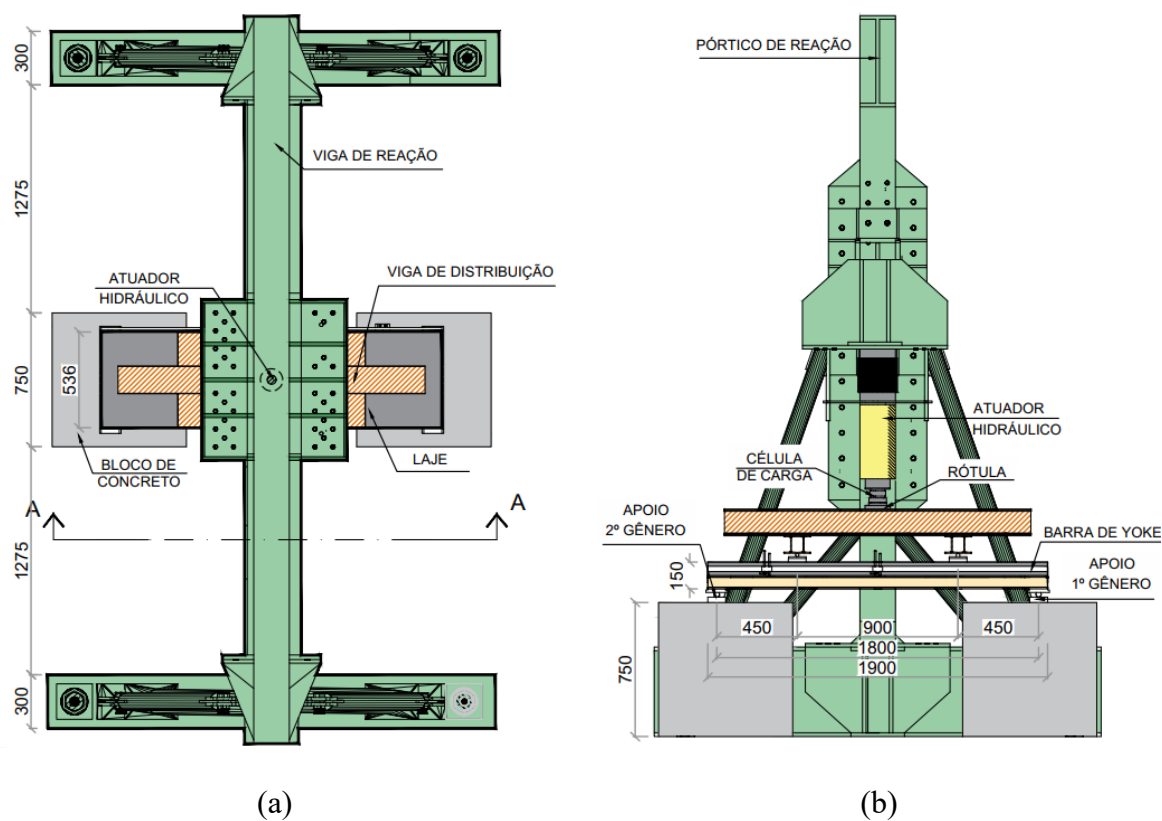


Figura 48 - Medidas gerais do *setup* do ensaio (medidas em milímetros). (a) Vista superior; (b) Corte AA.

#### 4.7.1. Instrumentação

A instrumentação do ensaio consiste na utilização de transdutores de deslocamento do tipo LVDT para medir o deslocamento vertical da laje mista e instalação de extensômetros (*strain gages*) elétricos unidirecionais do tipo KFGS-5-120-C1-11 (5 mm × 1,4 mm) para medir as deformações específicas da fôrma permanente de PRFV e do tipo KC70-120-A1-11 (80 mm × 7,5 mm) para medir as deformações específicas do concreto, ambos da marca *Kyowa Eletronic Instruments* com resistência igual a 120 Ω.

Para a aplicação dos extensômetros o local de instalação será tratado de acordo com o que orienta o fabricante, com o lixamento e limpeza da superfície com álcool isopropílico, demarcação da área e fixação com cola instantânea, cobrindo com filme de polietileno e pressionando firmemente por um minuto. Após a fixação do extensômetro foi feita a soldagem dos terminais de ligação e fixação da fiação por meio de cola instantânea e *silver tape*. Após a finalização da instalação foram realizados testes de resistência elétrica para verificar seu funcionamento antes da conexão final com o sistema de aquisição.

A instrumentação de cada laje mista foi posicionada de acordo com a Figura 49, sendo utilizado ao total 6 LVDTs e 5 extensômetros para cada espécime.

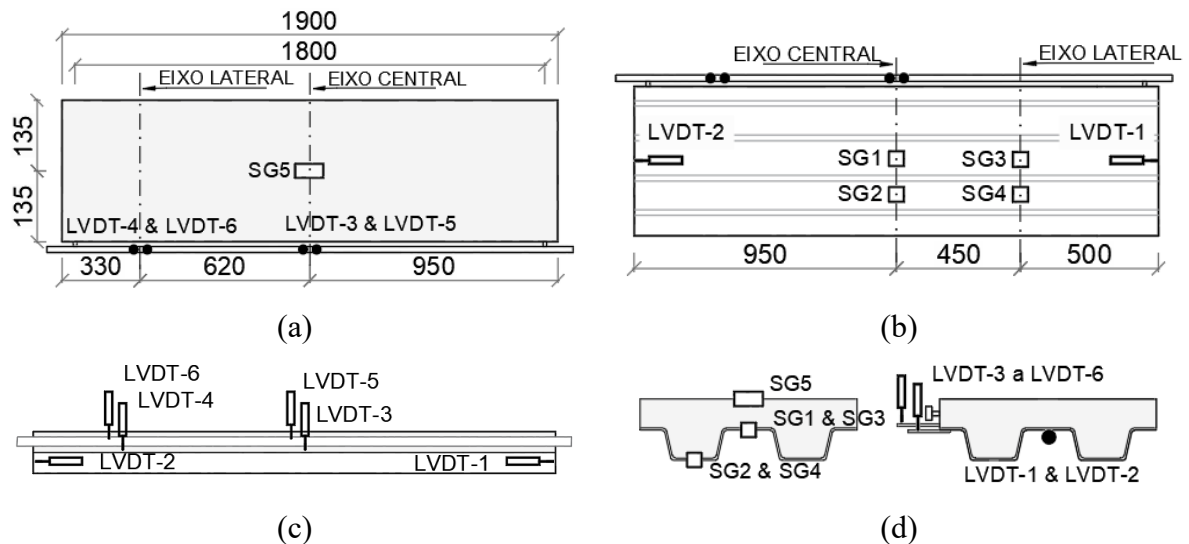


Figura 49 - Posicionamento extensômetros e LVDTs nos corpos de prova. (a) Visão superior; (b) visão inferior; (c) visão lateral; (d) seção transversal.

Os LVDTs 1 e 2 foram posicionados para medir o deslizamento relativo entre o concreto e a fôrma, conforme detalhe apresentado na Figura 50a. Este sistema é um sistema a prova de erros (*poka yoke*), similar ao recomendado pelo RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2002). Os anteparos aos quais os LVDTs 3 e 4 encostavam foram instalados na fôrma de PRFV. Já os anteparos aos quais os LVDTs 5 e 6 encostavam foram fixados no concreto, medindo assim

separadamente os deslocamentos da fôrma de PRFV e do CARFA, conforme Figura 50a e Figura 50b. O extensômetro do concreto foi instalado na parte superior da laje e os extensômetros da fôrma foram instalados nas nervuras superiores e interiores no eixo central e de carga da laje, conforme detalhes apresentados na Figura 50c.

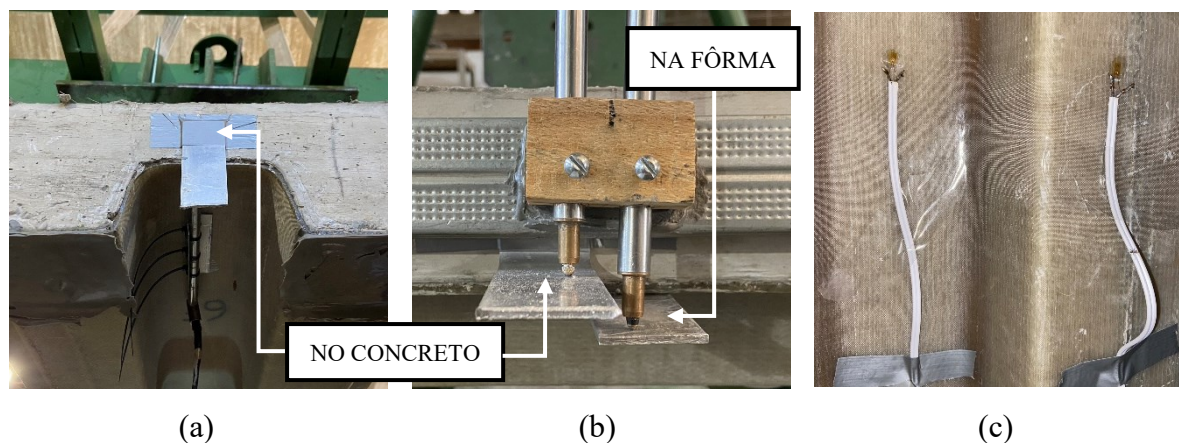


Figura 50 - Detalhes da instrumentação. (a) deslocamento relativo; (b) posição das chapas; (c) extensômetros.

Uma visão geral da configuração experimental, com a instrumentação utilizada no ensaio, pode ser vista na Figura 51.



Figura 51 - Configuração final da instrumentação

#### 4.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Capítulo 4 foi retratado o programa experimental realizado para este trabalho. Por meio deste, foram definidos as amostras e os parâmetros de testes, apresentado o sistema de produção da fôrma permanente para a laje mista, detalhados os ensaios que foram realizados para a caracterização dos materiais utilizados, bem como o *setup* e instrumentação utilizados para o ensaio de flexão à quatro pontos para a laje mista. Dessa forma, toda a configuração utilizada para caracterizar a produção experimental foi detalhada, sendo abordados no capítulo subsequente os resultados do programa apresentado.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, neste capítulo, os resultados experimentais obtidos por meio do desenvolvimento do programa experimental. São expostos os resultados da caracterização do concreto e PRFV, capacidade de carga, forma de ruptura, deslocamentos verticais das lajes, deformações da fôrma e concreto e deslizamento relativo entre a fôrma e o concreto.

### 5.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO PROPOSTO

Para o início do pré-dimensionamento ponderado alguns dados iniciais foram estimados de acordo com a Tabela 6. Posteriormente as propriedades foram atualizadas com base nos resultados dos ensaios, sendo os valores do modelo analítico comparados à capacidade de carga experimental das lajes.

Tabela 6 - Dados iniciais estimados para o pré-dimensionamento.

Descrição	Símbolo		Valor	Und
Deformação última de ruptura	$\varepsilon_{fu*}$	=	0,0200	mm/mm
Resistência última à tração	$f_{fu*}$	=	552	N/mm <sup>2</sup>
Resistência última à tração na transversal	$f_{fu*,t}$	=	20	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	$E_f$	=	27600	MPa
Espessura nominal da fôrma de PRFV	$t_f$	=	5	mm
Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra	$x$	=	44,18	mm
Resistência à compressão do concreto	$f_{ck}$	=	25	MPa
Seção transversal efetiva	$A_{ef}$	=	3.304	mm <sup>2</sup>
	$d_f$	=	108	mm
Comprimento Vão 1	$L_{f,1}$	=	2,50	m
Comprimento Vão 2	$L_{f,2}$	=	1,80	m

#### 5.1.1. Ponderação da resistência do PRFV

##### 5.1.1.1. Coefficiente de ponderação devido à exposição ambiental

De acordo com o a Tabela 6. Foi calculado a ponderação devido a exposição ambiental por meio da equação (40) e (41).

$$f_{fu} = 0,75 \cdot 552 = 414 \text{ N/mm}^2 \quad (40)$$

$$\varepsilon_{fu} = 0,75 \cdot 0,02 = 0,015 \text{ mm/mm} \quad (41)$$

### 5.1.1.2. Resistência nominal à flexão

À partir do valor encontrado para  $\varepsilon_{fu}$  foi calculada a ponderação considerada na resistência nominal à flexão, por meio da deformação de destacamento ( $\varepsilon_{fd}$ ) calculada na equação (42), e deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) calculada na equação (43).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{25}{3 \cdot 27600 \cdot 5}} \leq 0,9 \cdot 0,015 \quad \therefore \quad \varepsilon_{fd} = 0,0032 \text{ mm/mm} \quad (42)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{108 - 44,18}{44,18} \right) \leq 0,0032 \quad \therefore \quad \varepsilon_{fe} = 0,0032 \text{ mm/mm} \quad (43)$$

Dessa forma, a tensão máxima de tração ponderada  $f_{fe,d}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe,d} = E_f \varepsilon_{fe} = 27600 \cdot 0,0032 = 87,94 \text{ MPa} \quad (44)$$

### 5.1.1.3. Resistência nominal ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento foi ponderada de acordo com a equação (45) a (50).

$$L_e = \frac{23,300}{(5 \cdot 27600)^{0,58}} = 24,33 \quad (45)$$

$$k_1 = \left( \frac{25}{27} \right)^{2/3} = 0,95 \quad (46)$$

$$k_2 = \frac{109 - 24,33}{109} = 0,77 \quad (47)$$

$$\kappa_v = \frac{0,95 \cdot 0,77 \cdot 24,33}{11,900 \cdot 0,018} \leq 0,75 \quad \therefore \quad \kappa_v = 0,02 \quad (48)$$

$$\varepsilon_{fe,v} = 0,02 \cdot 0,018 \leq 0,004 \quad \therefore \quad \varepsilon_{fe,v} = 0,0003 \text{ mm/mm} \quad (49)$$

Dessa forma, a tensão resistente de cisalhamento ponderada  $f_{fe,v}$  adotada será:

$$f_{fe,v} = E_f \varepsilon_{fe,v} = 27600 \cdot 0,0003 = 9,34 \text{ MPa} \quad (50)$$

## 5.1.2. Verificação da laje mista na fase final

### 5.1.2.1. Determinação do momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente leva em conta os esforços internos na seção transversal. Como o somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, tomou-se a força de tração na fôrma  $N_{frrp}$  como parâmetro para o cálculo do momento resistente ponderado ( $M_{rd}$ ), conforme equação (51) a (54).

$$N_{frp} = A_{ef} \cdot f_{fe,d} = 3.304 \cdot 87,94 = 290,54 \text{ kN} \quad (51)$$

$$y_l = 108 - 0,80 \cdot 44,18 \cdot 0,5 = 90,33 \text{ mm} \quad (52)$$

$$M_r = \psi_f \cdot N_{frp} \cdot y_l = 290,54 \cdot 90,33 \cdot 10^{-3} = 22,30 \text{ kN.m} \quad (53)$$

$$M_{rd} = \phi \cdot M_r = 0,8 \cdot 22,30 = 17,84 \text{ kN.m} \quad (54)$$

### 5.1.2.2. Verificação entre o momento resistente e o momento solicitante

A verificação entre o momento resistente e o momento solicitante pode ser vista por meio da Tabela 7, o qual é possível verificar que o valor do momento resistente é superior ao momento solicitante em qualquer um dos estados limites admitidos.

Tabela 7 - Comparativo entre momento resistente e momento solicitante

Descrição	Vão 01 (kN.m)	Vão 02 (kN.m)
Estado limite último - normal	3,17	1,65
Estado limite último - construtivo	1,88	0,97
Estado limite de serviço - normal	1,15	0,60
Estado limite de serviço - construtivo	1,53	0,79
Momento resistente	17,84	17,84

### 5.1.2.3. Determinação da resistência ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento da laje com fôrma trapezoidal de PRFV foi determinada por meio da equação (55) a (60)

$$V_c = \frac{63 \cdot \sqrt[3]{25^2} \cdot 21.817,09}{1,4 \cdot 96 \cdot 1000} = 87,44 \text{ kN} \quad (55)$$

$$V_{cMAX} = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{25} \cdot 21.817,09}{96} = 284,08 \text{ kN} \quad (56)$$

$$V_{frp, v\tilde{A}O1} = 2 \cdot 9,34 \cdot 5 \cdot 2,50 \cdot 64,7/1000 = 14,99 \text{ kN} \quad (57)$$

$$V_{frp, v\tilde{A}O2} = 2 \cdot 9,34 \cdot 5 \cdot 1,80 \cdot 64,7/1000 = 10,80 \text{ kN} \quad (58)$$

Dessa forma, a resistência ao cisalhamento da seção é dada por:

$$V_{n, v\tilde{A}O1} = 0,80 \cdot (87,44 + 0,85 \cdot 14,99) \leq 284,08 \therefore V_{n, v\tilde{A}O1} = 80,15 \text{ kN} \quad (59)$$

$$V_{n, v\tilde{A}O2} = 0,80 \cdot (87,44 + 0,85 \cdot 10,80) \leq 284,08 \therefore V_{n, v\tilde{A}O2} = 77,29 \text{ kN} \quad (60)$$

#### 5.1.2.4. Verificação entre a resistência ao cisalhamento e o esforço solicitante

A verificação entre a resistência ao cisalhamento da seção transversal e o esforço solicitante pode ser vista por meio da Tabela 8, o qual é possível verificar que o valor resistente é superior ao solicitante em qualquer um dos estados limites admitidos.

Tabela 8 - Comparativo entre momento resistente e momento solicitante

Descrição	Vão 01 (kN)	Vão 02 (kN)
Estado limite último - normal	5,08	3,66
Estado limite último - construtivo	3,01	2,17
Estado limite de serviço - normal	1,84	1,33
Estado limite de serviço - construtivo	1,53	0,79
Esforço resistente ao cisalhamento	80,15	77,29

#### 5.1.2.5. Cálculo do momento de inércia da seção homogeneizada

Primeiramente calcula-se a razão modular:

$$\alpha_E = \frac{27.600}{1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25}} = \frac{27.600}{33.600} = 0,82 \quad (61)$$

Por meio da equação (29) e do resultado obtido na equação (61), calcula-se o momento de inércia efetivo da seção homogeneizada utilizando o método dos eixos paralelos:

$$I_{ef} = \left[ \frac{53,6 \cdot 4,418^3}{12} + 53,6 \cdot 4,418 \cdot \left( \frac{4,418}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{380,60 + 33,04(10,8 - 4,418)^2}{0,82} \right] \quad (62)$$

$$I_{ef} = 3.642,30 \text{ cm}^4 \quad (63)$$

#### 5.1.2.6. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

Utilizando a equação (33) calcula-se a deflexão estimada para a laje mista, considerando na fase inicial apenas o momento de inércia da fôrma e na fase final o momento de inércia homogeneizado. Na Tabela 9 é possível verificar o comparativo do dimensionamento levando em consideração a deflexão da laje mista.

Tabela 9 - Comparativo entre a deflexão máxima e a calculada para a estrutura

Descrição	Vão 01 (mm)	Vão 02 (mm)
Flecha máxima inicial - Lf/180	13,89	10,00
Fase inicial – Calculada	1,17	0,31
Flecha máxima final - Lf/350	7,14	5,14
Fase final – Calculada	0,07	0,02



A deflexão final da laje é dada pelo somatório da flecha na fase inicial e na fase final, sendo 1,24 mm para o vão de 2,5 m e 0,33 mm para o vão de 1,80 m, o qual os dois vãos atendem ao estado limite último. Tendo em vista que ambos os vãos obtiveram resultados promissores no estudo analítico, determinou-se prosseguir com o vão de menores dimensões para o programa experimental.

### 5.1.3. Determinação da quantidade necessária de fibras de vidro

Tendo a taxa de fibra e resina, bem como seus respectivos módulos de elasticidade é possível estimar a quantidade necessária de fibras de vidro para atender aos dados estimados.

Dessa forma, com base na literatura (Callister e Rethwisch, 2016), o módulo de elasticidade da fibra ( $E_{fiber}$ ) foi admitido em 72.500 MPa, enquanto o módulo de elasticidade da matriz de poliéster ( $E_m$ ) foi admitido em 3.235 MPa, com um volume de fibras de inicial 50% para o compósito, calculado pela equação (64).

$$E_{f,50} = 72.500 \cdot 0,5 + 3.235,00 \cdot 0,5 = 37.867,50 \text{ MPa} \quad (64)$$

Com base na taxa de proporção escolhida, estima-se 2,50 mm para a fibra de vidro e 2,50 mm para a resina poliéster. Por meio da densidade dos materiais e a área da seção transversal da fôrma é possível definir a massa de fibra pra o vão 2 adotado, com comprimento de 1,80 m, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Massa de fibra e resina para o vão de 1,80 m.

Descrição	Valor	Und
Densidade de Fibra de Vidro	2.550	kg/m <sup>3</sup>
Densidade de Resina Poliéster	1.180	kg/m <sup>3</sup>
Massa de fibra para o vão 2	8,59	kg
Massa de resina poliéster para o vão 2	3,97	kg

Com base nos dos apresentados, adotou-se os três tipos de fôrma para o programa experimental, estabelecendo um valor para a massa de fibra igual à 11,7 kg, 9,18 kg e 6,66 kg para as lajes D8F, D6F e D4F, respectivamente.

## 5.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

### 5.2.1. Polímero reforçado com fibra de vidro

O comportamento tensão  $\times$  deformação é apresentado na Figura 52 na direção normal das fibras principais para as fôrmas D4F, D6F e D8F. Conforme informado no item 4.4, a medida da deformação axial foi realizada até 0,5% de deformação para os compósitos, sendo aferidos apenas para as fibras principais à 0°.

Perante ao exposto, é apresentado na Figura 53 o comportamento tensão  $\times$  deslocamento da prensa aferido no ensaio para cada compósito ensaiado na direção principal das fibras à 0°, com as fibras longas e CSM resistindo aos esforços, e para a direção secundária à 90°, resistida basicamente pelo CSM. Por meio dos resultados expostos na Figura 52 é possível verificar um comportamento linear elástico similar entre os compósitos, com maiores diferenças conforme o crescimento da tensão, consoante ao observado na Figura 53.

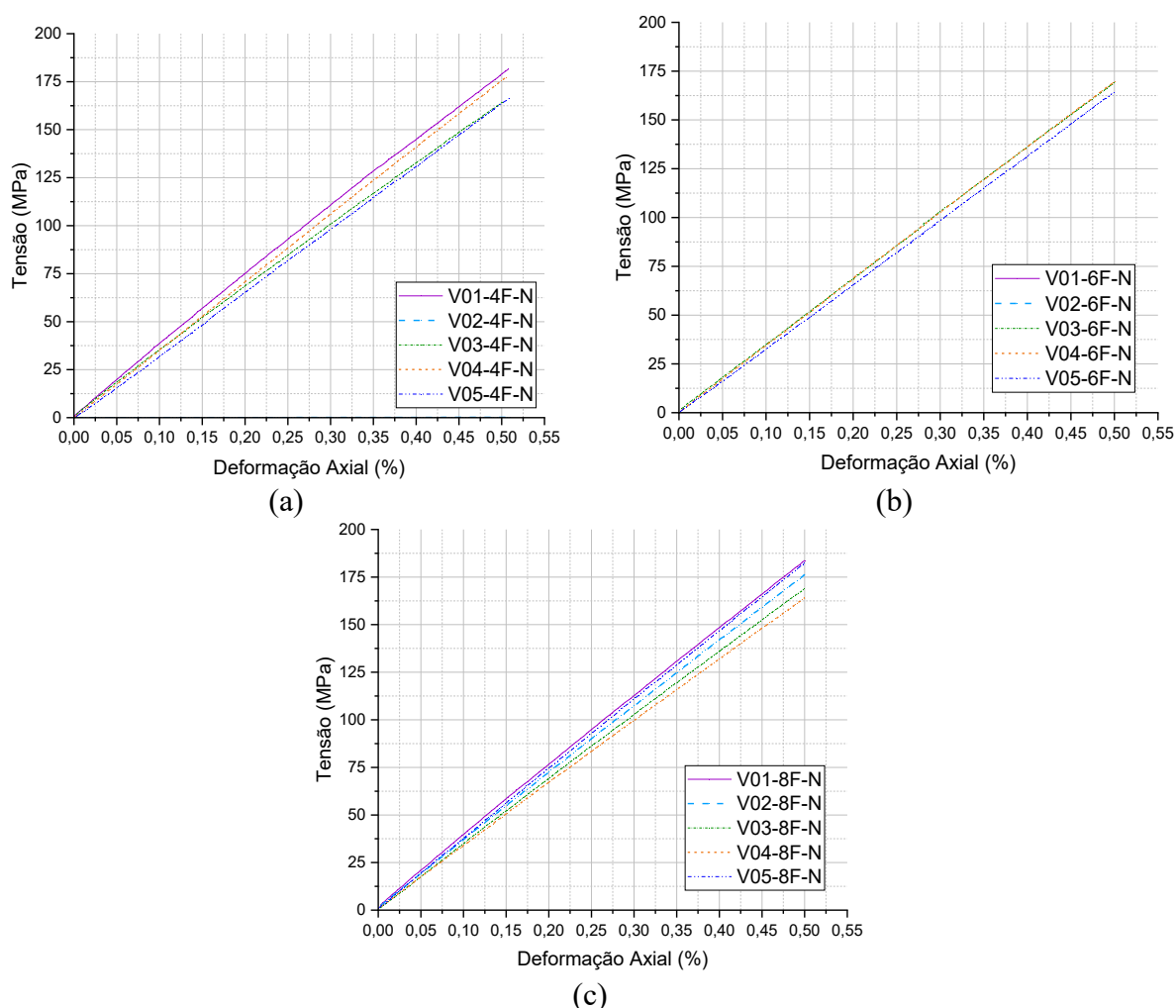


Figura 52 - Ensaio de tração direta. (a) D4F direção 0°; (b) D6F direção 0°; (c) D8F direção 0°.

Na Figura 53a e Figura 53b são apresentados os resultados para os compósitos de 2,92 mm de espessura, para a direção normal e perpendicular à direção principal. Em ambos os casos os corpos de prova apresentaram um comportamento linear elástico até a ruptura, comportamento este também observado para os compósitos de 4,20 mm apresentados na Figura 53c e Figura 53d e na direção de 90° do compósito D8F, conforme Figura 53f. Já ao observar Figura 53e é possível constatar uma região com grandes deslocamentos e pouco acréscimo de carga, sendo este comportamento devido ao escorregamento das chapas metálicas utilizadas nos grampos, o qual foram coladas com cola instantânea e posteriormente cola epóxi, ocorrendo deslizamentos nos dois casos, apresentando os resultados com adesivo epóxi. Em virtude disso, a resistência à tração do compósito com 5,28 mm de espessura foi estimada de acordo com a resistência dos outros dois materiais em função da quantidade de fibras unidirecionais utilizadas em cada um deles.

Ao observar apenas os comportamentos na região perpendicular é possível verificar que o compósito de menor espessura possui maior tensão de resistência à tração à 90°, isso é devido ao fato de que a quantidade de fibras resistentes nesta direção são fixas para todos os materiais, aumentando a tensão ao mesmo tempo que se diminui a área da seção transversal resistente.

Durante os ensaios foi possível ouvir estalos advindos dos compósitos, o que se assemelhava à fibra rompendo fio a fio, sendo observadas rupturas distintas para angulações diferentes devido ao posicionamento das fibras utilizado na produção dos compósitos.

Na direção de 0°, sendo a direção principal da tração, com a atuação principal das fibras longas, foi possível verificar uma ruptura repentina, de forma frágil das fibras em todo seu comprimento, conforme pode ser visto na Figura 54a. Na direção de 90°, com a atuação principal das fibras curtas e aleatórias, foi possível verificar uma ruptura pontual, em geral próximo do centro, de forma lateral, conforme pode ser visto na Figura 54b.

Na Tabela 11 observam-se os resultados obtidos por meio do ensaio de tração direta realizado para três tipos de espessura dos polímeros reforçados com fibra de vidros produzidos para esta pesquisa.

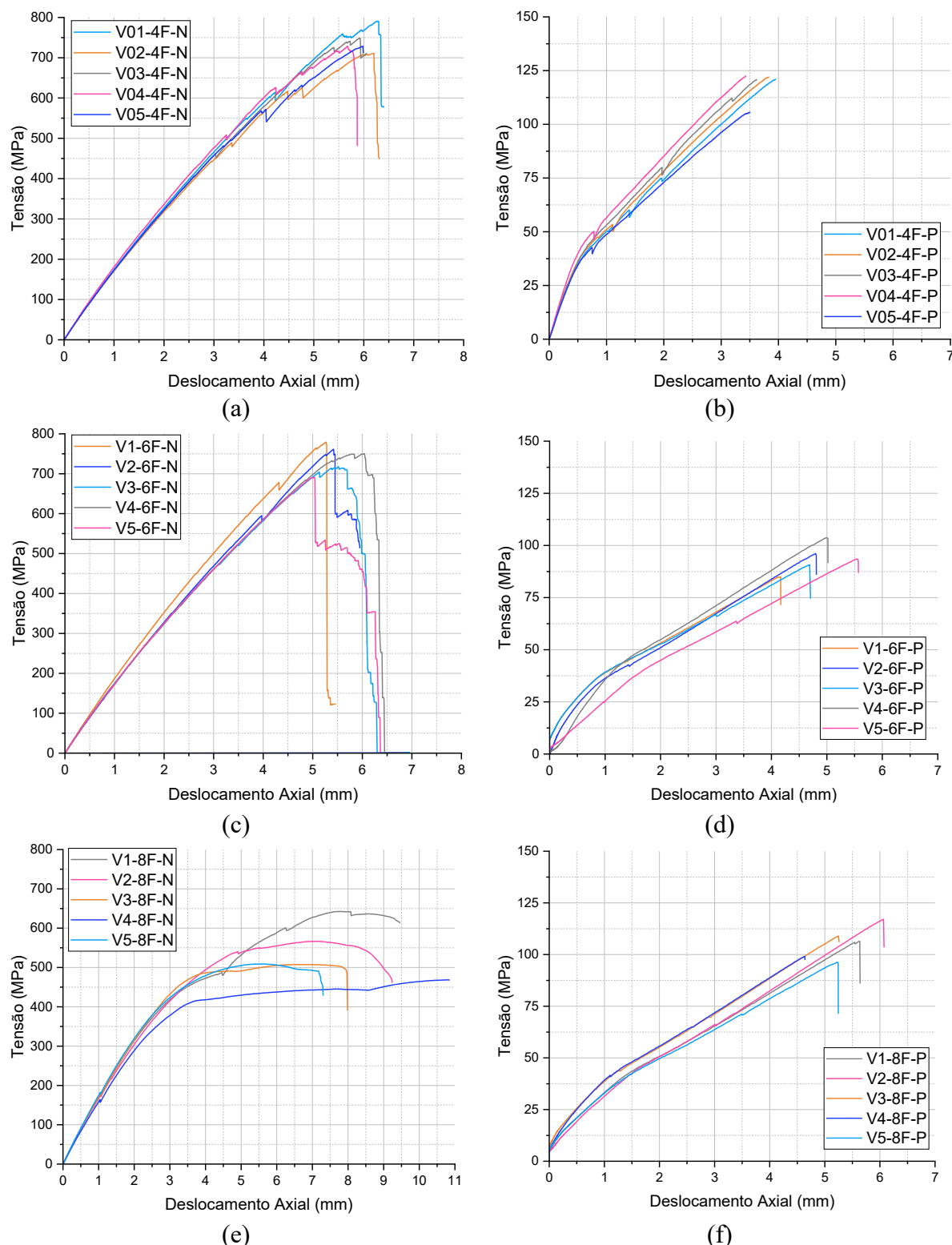


Figura 53 - Ensaio de tração direta – Tensão × Deslocamento. (a) D4F direção 0°; (b) D4F direção 90°; (c) D6F direção 0°; (d) D6F direção 90°; (e) D8F direção 0°; (f) D8F direção 90°.

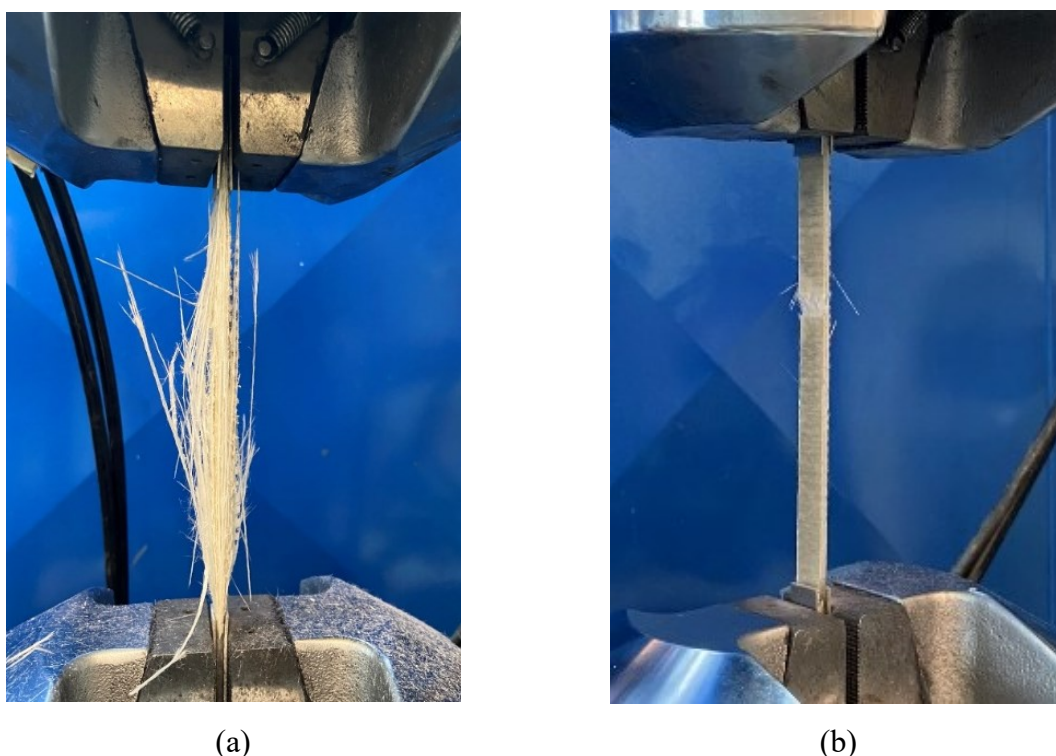


Figura 54 - Ensaio de Tração direta realizados. (a) Ruptura à 0°; (b) Ruptura à 90°.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração direta

Código da fôrma	Fibra de Vidro (kg/m <sup>2</sup> )		Nº	Espessura		Resistência à tração ( $f_{fu}$ *)				Módulo de elasticidade (GPa)	
	Contínua unidirecional	CSM		Média (mm)	CV (%)	0° (MPa)	CV (%)	90° (MPa)	CV (%)	0°	CV (%)
D4F	2,8	0,9	1	2,91	0,27	791,02	6,65	120,97	2,15	34,15	2,73
			2	3,06	4,75	711,04	4,13	122,02	3,04	32,80	1,33
			3	2,94	0,75	749,12	1,01	120,81	2,02	31,62	4,88
			4	2,81	3,82	728,68	1,75	122,60	3,53	34,80	4,69
			5	2,88	1,42	728,48	1,78	105,65	10,75	32,84	1,21
D6F	4,2	0,9	1	3,95	5,88	779,29	2,53	84,99	9,39	32,87	0,65
			2	4,28	1,91	761,45	0,19	96,15	2,51	33,31	0,68
			3	4,31	2,78	717,62	5,58	90,74	3,26	33,01	0,23
			4	4,22	0,48	750,31	1,28	103,64	10,49	33,33	0,74
			5	4,23	0,71	791,52	4,14	93,46	0,35	32,91	0,53
D8F	5,6	0,9	1	5,30	0,33	642,43	19,22	106,38	0,79	35,48	3,81
			2	5,26	0,49	566,61	5,15	117,06	10,91	34,41	0,68
			3	5,27	0,30	507,64	5,79	108,99	3,26	33,08	3,21
			4	5,48	3,67	468,52	13,05	99,07	6,15	32,20	5,79
			5	5,11	3,21	509,06	5,53	96,26	8,81	35,72	4,51
	Média D4F		2,92	2,20	741,67	3,06	118,42	4,30	33,24	2,97	
	Média D6F		4,20	2,35	760,04	2,74	93,79	5,20	33,09	0,57	
	Média D8F		5,28	1,60	538,85 <sup>1</sup>	9,75	105,55	5,98	34,18	3,60	

<sup>1</sup> Resistência obtida no ensaio, todavia ocorreu escorregamento das chapas durante os ensaios. A resistência estimada é de 778,40 MPa com base nos outros compósitos ensaiados.

### 5.2.2. Avaliação da qualidade dos compósitos

A avaliação da qualidade de produção dos compósitos envolveu três parâmetros essenciais: espessura, módulo de elasticidade e resistência à tração. Essa análise foi conduzida para cada tipo de fôrma fabricada, sendo estas D4F, D6F e D8F. Para avaliar os dados, foi utilizada uma análise da magnitude do coeficiente de variação como tratamento estatístico.

A fim de avaliar a magnitude do coeficiente de variância, utilizou-se a mesma classificação proposta por Gomes (2009). Nessa classificação, coeficientes superiores a 30% foram considerados como muito altos, valores entre 20% e 30% como altos, valores entre 10% e 20% como médios, e valores inferiores a 10% como baixos, sendo admitidos como satisfatórios os dados classificados como baixos e médios.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 11 com base na classificação de Gomes (2009), observa-se que todos os resultados encontrados para espessura e módulo de elasticidade foram classificados baixos. Quanto à resistência à tração à 0°, foram identificados 13 valores baixos e 2 valores médios, enquanto que para a resistência à 90°, foram classificados 12 valores baixos e 3 valores médios. Todos os resultados obtidos atendem aos critérios de magnitude do coeficiente de variância e são considerados satisfatórios.

Na Figura 55 são apresentados os valores máximos, mínimos e médios em um gráfico de barras para espessura, módulo de elasticidade e resistência à tração.

No que diz respeito à espessura, é possível observar na Figura 55b que houve poucas variações entre a média e os valores extremos registrados. Na Figura 55c, é possível verificar que os corpos de prova D6F e D4F apresentaram ampliações semelhantes, enquanto a fôrma D8F mostrou uma grande variação com valores relativamente baixos, sendo mais um indício do escorregamento das chapas de aço e inadequação dos resultados. Por outro lado, a variação encontrada na Figura 55d pode ser atribuída à própria variação do CSM, que tem um impacto direto nos resultados, uma vez que as fibras possuem uma disposição aleatória em sua constituição. Um comportamento semelhante é observado na Figura 55e.

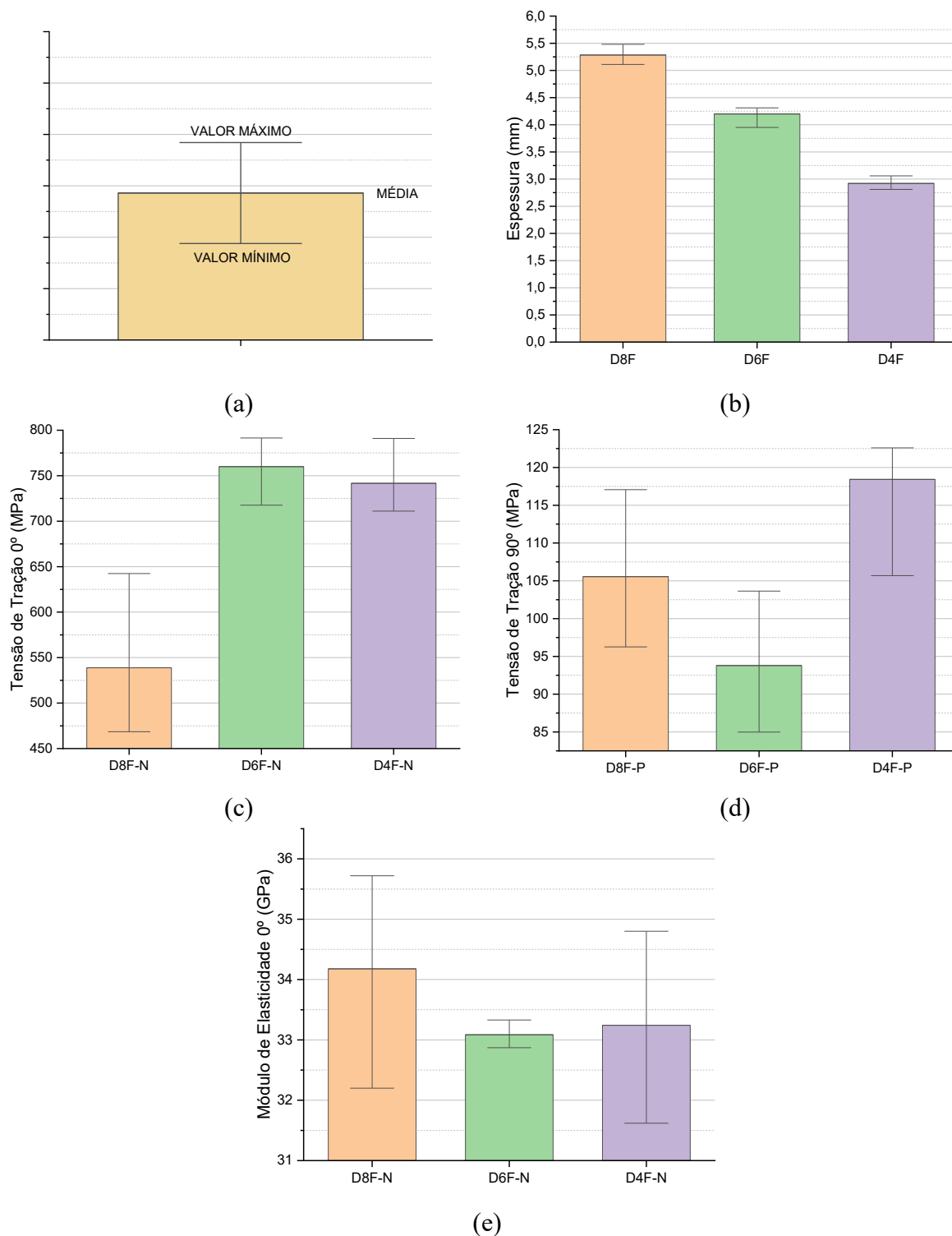


Figura 55 - Valores médios, máximos e mínimos. (a) legenda; (b) espessura; (c) módulo de elasticidade à 0°; (d) resistência à tração à 0°; (e) resistência à tração à 90°.

### 5.2.3. Concreto Autoadensável Reforçado com Fibra de Aço

Para a caracterização no estado fresco, conforme mencionado no item 4.6, foi utilizado o método do espalhamento (*slump-flow*), sendo obtido uma média de 61 mm para os concretos utilizados, conforme pode ser visto na Figura 56a.

Para a caracterização no estado endurecido foi realizado o ensaio de compressão axial, o qual os corpos de prova foram preparados utilizando uma retífica, para garantir a planicidade da área da seção transversal do corpo de prova, conforme Figura 56b. Os ensaios de compressão axial executados até a ruptura, podendo ser vista na Figura 56c, sendo os resultados apresentados na Tabela 12.

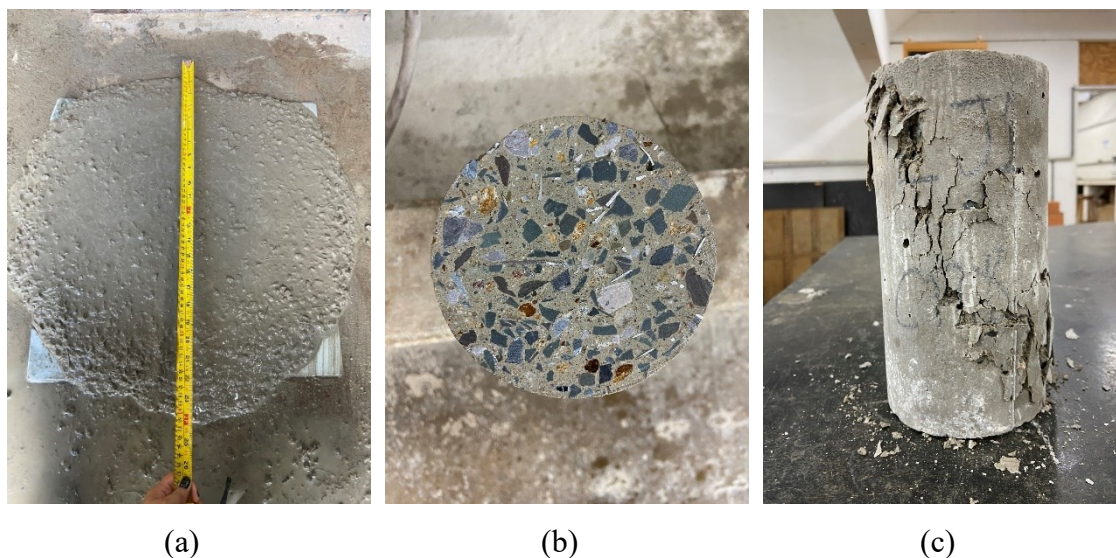


Figura 56 – Caracterização do concreto. (a) espalhamento; (b) corpo de prova retificado; (c) ruptura.

Conforme pode ser visto na Tabela 12, houve uma diferença significativa entre o traço utilizado na laje D6F e o traço utilizado na D8F, todavia essa diferença não afetou o modo de falha ao analisar o comportamento das lajes. Os valores encontrados para o  $f_{ck}$  da laje D6F e D8F foram, respectivamente, 26,89 MPa e 20,05 MPa.

Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto

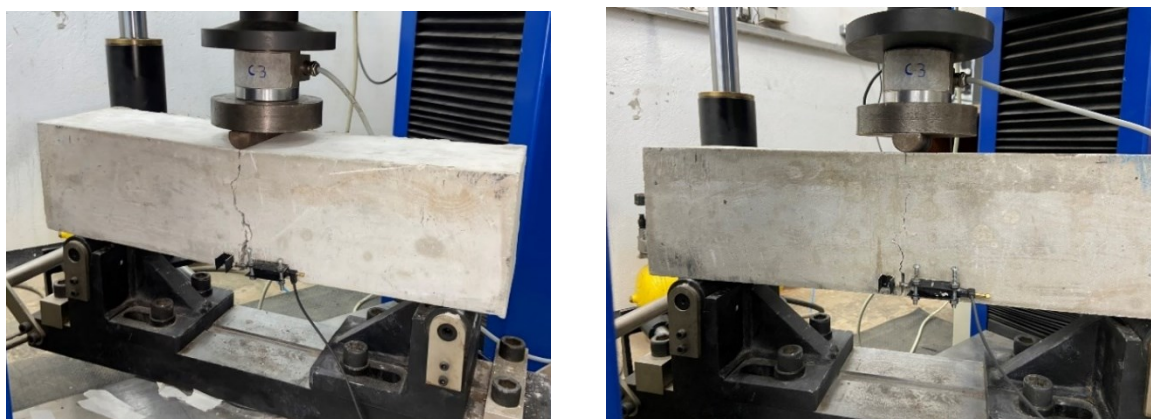
Amostragem	Laje	CP	Resistência à Compressão (MPa)	
			Valor	CV
01	D6F	01	27,74	3,14
		02	26,05	3,14
		01	18,79	6,31
02	D8F	02	20,84	3,93
		03	20,53	2,38

Nos testes de flexão a três pontos, foi observada uma única fissura no ponto de ruptura, com ligeiros desvios da região central, conforme podem ser vistos na Figura 57.

A curva Carga  $\times$  CMOD e o gráfico Tensão de Flexão  $\times$  CMOD, provenientes dos resultados do teste, podem ser vistos na Figura 58a. Apesar de terem sido moldados três corpos de prova, os resultados do terceiro espécime foram desprezados devido a uma grande



discrepância nos resultados. As forças residuais de cada amostra estão destacadas na Figura 58b. As forças residuais foram calculadas de acordo com a equação (39) para considerando  $b = 156 \text{ mm}$  e  $h_{sp} = 132 \text{ mm}$  para V01 e  $b = 153 \text{ mm}$  e  $h_{sp} = 124 \text{ mm}$  para V02. Os limites de proporcionalidade para os corpos de prova V01 e V02 foram, respectivamente, 3,82 MPa e 3,76 MPa, também calculados de acordo com a equação (39).

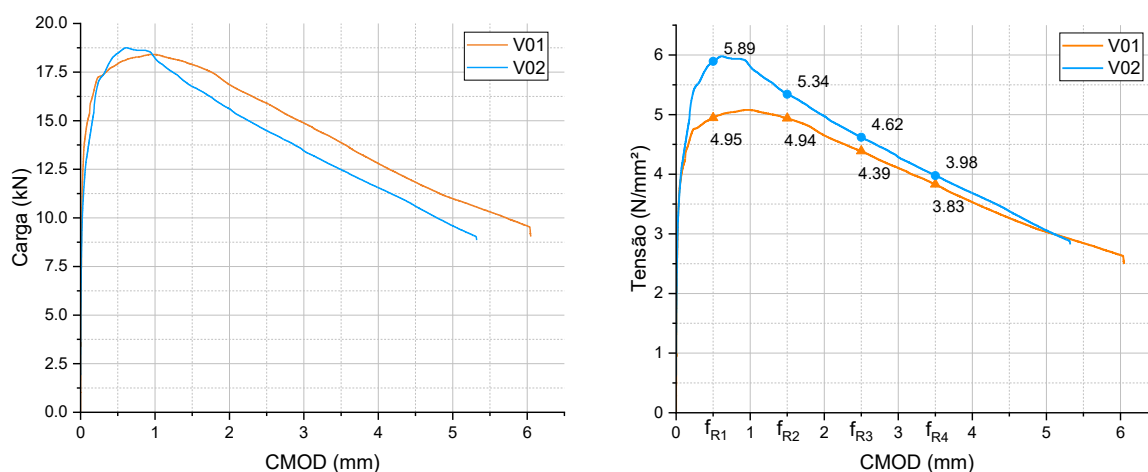


(a)

(b)

Figura 57 - Rupturas dos corpos de prova no ensaio de flexão a três pontos. (a) V01; (b) V02.

Os resultados obtidos revelam uma dispersão entre os resultados de V01 e V02, o que é comum para concreto reforçado com fibras devido a variações na distribuição e orientação das fibras dentro do concreto. Esse comportamento também foi observado em pesquisas anteriores realizadas por Cardoso (2020), com valores semelhantes para concreto da classe 20 MPa.



(a)

(b)

Figura 58 – Comportamento dos corpos de prova no ensaio de flexão à três pontos. (a) Curva Carga  $\times$  CMOD; (b) Curva tensão na flexão  $\times$  CMOD, com tensões residuais demarcadas.

Tabela 13 - Resultado das forças residuais para CMOD 0,5 a 3,5.

V01			V02		
$F_i$ (kN)	CMOD (mm)	$f_{R,i}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_i$ (kN)	CMOD (mm)	$f_{R,i}$ (N/mm <sup>2</sup> )
17,93	0,50	4,95	18,48	0,50	5,89
17,90	1,50	4,94	16,76	1,50	5,34
15,90	2,50	4,39	14,49	2,50	4,62
13,88	3,50	3,83	12,47	3,50	3,98

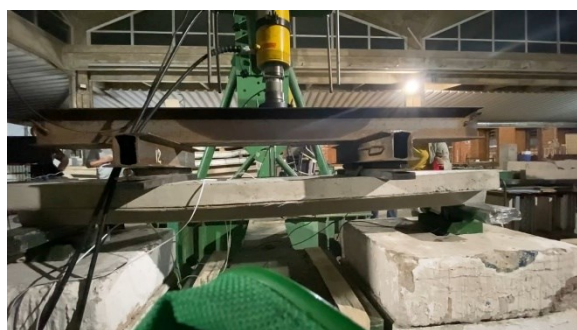
### 5.3. COMPORTAMENTO DAS LAJES MISTAS

O comportamento estrutural das lajes submetidas ao ensaio de flexão à quatro pontos é discutido de acordo com os resultados coletados nos ensaios experimentais. As lajes compósitas ensaiadas apresentam a espessura da fôrma como principal parâmetro variável, sendo comparadas diretamente entre si e com a literatura existente. Tais análises foram realizadas visando investigar o efeito da variação deste parâmetro no comportamento e resistência do elemento estrutural.

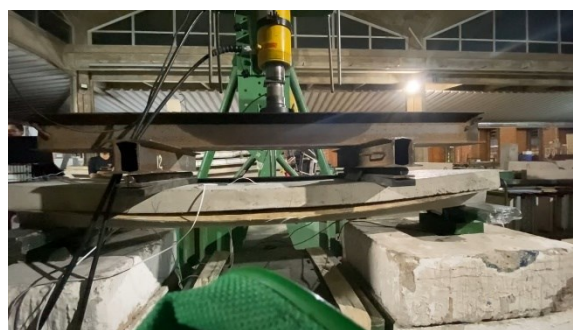
#### 5.3.1. Capacidade de carga e modos de ruptura

Durante a aplicação da carga nas amostras, foram observados vários comportamentos esperados, incluindo cisalhamento vertical, cisalhamento longitudinal e flexão. O modo de falha predominante em ambas as amostras foi a falha por flexão, com deformação local do tabuleiro ocorrendo em sua capacidade máxima de carga.

A laje D8F inicialmente apresentou uma fissura longitudinal entre a fôrma de PRFV e o concreto em uma carga de 50,45 kN, podendo ser visto na Figura 59a, sem alterações na rigidez geral ou na capacidade de carga. Conforme a carga continuou a ser aplicada, a deformação e o desprendimento inicial das abas laterais da fôrma trapezoidal se tornaram perceptíveis (Figura 59b), com um deslocamento inicial de 4,26 mm localizado no eixo central com uma carga aplicada de 61,34 kN, representando 63,52% de sua capacidade de carga. Apesar do deslocamento nas bordas da laje, ela continuou a exibir uma alta capacidade de carga, com os deslocamentos aumentando quase linearmente com a carga aplicada, experimentando pequenas diminuições à medida que o deslizamento lateral e o desprendimento do tabuleiro ocorriam.



(a)



(b)



(c)



(d)



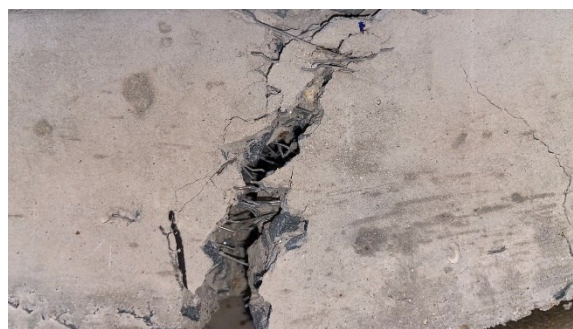
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 59 - Comportamento à flexão laje D8F. (a) Fissura inicial longitudinal; (b) destacamento da fôrma; (c) deslizamento relativo; (d) configuração do revestimento de areia; (e) ruptura por flexão; (f) deformação local da fôrma; (g) ruptura interna da fôrma; (h) comportamento das fibras de aço.

No concreto, fissuras por cisalhamento vertical foram inicialmente observadas na região de aplicação da carga, seguidas por fissuras por flexão ao longo da mesa no vão central. Faz-se necessário, no entanto, que as fissuras internas na região de tração não puderam ser identificadas visualmente até o desprendimento da fôrma devido à sua configuração de fôrma permanente.

O deslizamento relativo horizontal da fôrma foi observado em ambas as extremidades da laje, e sua configuração final pode ser vista na Figura 59c. Após a conclusão do teste, foram observadas regiões onde a areia estava totalmente aderida ao concreto (Figura 59d), assim como regiões onde a areia estava aderida a fôrma, indicando a presença de uma aderência efetiva entre os materiais analisados.

O modo de falha final envolveu o aparecimento de fissuras no CARFA e ruptura por flexão da fôrma de PRFV em 96,5 kN (Figura 59e), já somado ao peso próprio e do *setup*, resultando em uma deformação local da fôrma no eixo central, podendo ser vista na Figura 59f, bem como a ruptura das fibras de vidro do compósito, conforme mostrado na Figura 59g. Ao observar as fissuras existentes na laje foi possível verificar a presença das fibras de aço servindo como ponte de aderência, costurando a fissura e promovendo uma ruptura mais dúctil, podendo ser vista na Figura 59h.

A fôrma D6F apresentou um comportamento ligeiramente diferente, sem fissuras aparentes e sem perda de capacidade de carga até atingir sua carga máxima de 91,3 kN devido ao cisalhamento longitudinal, apresentando uma fissura longitudinal (Figura 60a) que evoluiu imediatamente para o destacamento parcial da fôrma, conforme Figura 60b, iniciando assim o deslizamento relativo entre a fôrma e o concreto (Figura 60c), todavia, da mesma forma que na laje D8F, foram encontradas regiões com areia no concreto e areia na fôrma, conforme pode ser visto na Figura 60d, indicando que houve uma boa aderência entre os materiais.

Simultaneamente, após a laje D6F atingir a carga máxima, houve uma diminuição na capacidade última em 40,38%. No entanto, após essa diminuição inicial, a carga continuou a aumentar, resultando em uma falha final com uma carga de 88,77 kN (Figura 60e) por flexão, sendo esta apenas 2,77% menor do que a capacidade máxima obtida. A Figura 60f mostra a fôrma após a ruptura com deformação local no eixo de aplicação de carga (Ls), e, assim como observado na placa D8F, a falha final também envolveu a ruptura das fibras da fôrma (Figura 60g) e fissuras por cisalhamento e flexão no concreto (Figura 60h).

Uma série de comportamentos levaram às falhas observadas, começando com o desprendimento gradual da fôrma de PRFV, o que reduziu a rigidez da amostra e, em última instância, resultou na ruptura do elemento por flexão.

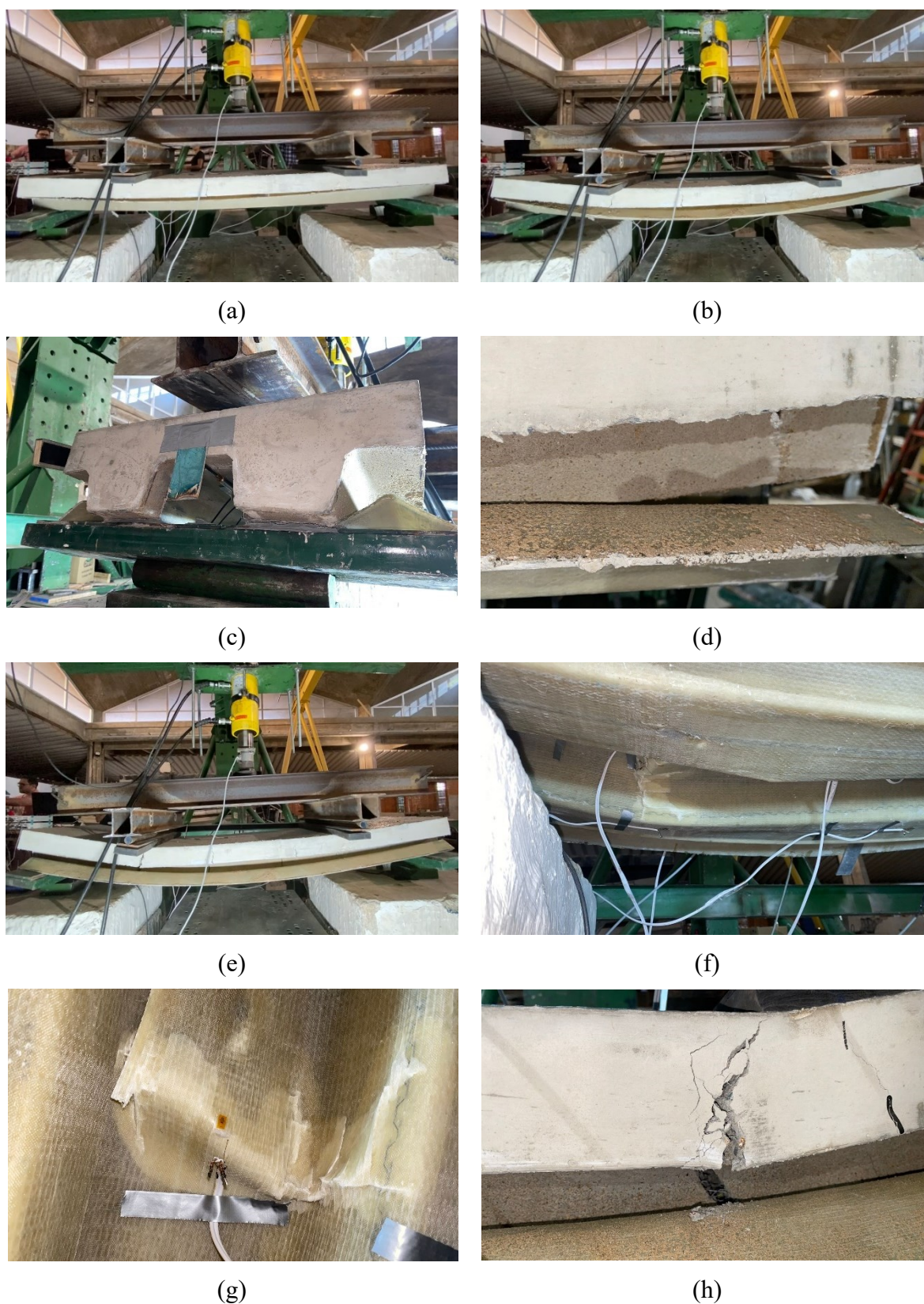


Figura 60 - Comportamento à flexão laje D6F. (a) Fissura inicial longitudinal; (b) destacamento da fôrma; (c) deslizamento relativo; (d) configuração do revestimento de areia; (e) ruptura por flexão; (f) deformação local da fôrma; (g) ruptura interna da fôrma; (h) comportamento das fibras de aço.

Um comportamento semelhante foi observado por Honickman (2008) em sua pesquisa sobre lajes de 400 mm compostas por concreto e uma placa reta de PRFV, que apresentaram uma fissura horizontal de descolamento ao longo da interface concreto  $\times$  placa, fissuras por flexão, deslizamento relativo e falha final devido ao desprendimento da placa em amostras com revestimento de areia para vãos de 1000 mm e 2200 mm.

Os valores para carga de descolamento, carga de ruptura e carga máxima das lajes estão resumidos na Tabela 14, o qual é possível verificar que ambas as lajes obtiveram uma boa capacidade de carga mesmo após o início do descolamento da fôrma, comportamento este oriundo da geometria da mesma, o qual foi possível observar que o descolamento iniciou das laterais para dentro, conforme o aumento da sollicitação da estrutura.

Tabela 14 - Forças registradas experimentalmente

Laje	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{fu}^*$ (MPa)	$t_r$ (mm)	Força de Descolamento (kN)	Força de Ruptura (kN)	Força de máxima (kN)
D6F	26,89	760,04	4,20	91,3	88,8	91,3
D8F	20,05	778,40 <sup>1</sup>	5,28	61,3	96,5	96,5

<sup>1</sup> Resistência estimada com base em outros compósitos ensaiados.

A variação nos modos de falha entre as lajes compósitas destaca a importância de estudar seus comportamentos, variações e capacidades para diferentes geometrias, bem como várias formas de conexões. Esses fatores influenciam diretamente o comportamento final da amostra e devem ser levados em consideração para determinar a capacidade de suporte de carga.

### 5.3.2. Deslocamentos verticais

O comportamento carga-deslocamento da laje D6F e D8F são apresentados a seguir. Os dados de deslocamentos foram coletados no eixo central e no eixo lateral conforme previamente ilustrado na Figura 49.

As Figuras Figura 61a e Figura 61b mostram, respectivamente, a curva carga-deslocamento da laje D6F no eixo central e lateral. Observa-se um pico de carga em ambos os gráficos os desprendimentos da laje à uma carga de 91,3 kN e uma deflexão de 6,33 mm no eixo central, resultando em uma diminuição na capacidade de carga seguida de deslocamentos significativos e aumento da carga até a ruptura, não superior a carga de descolamento.

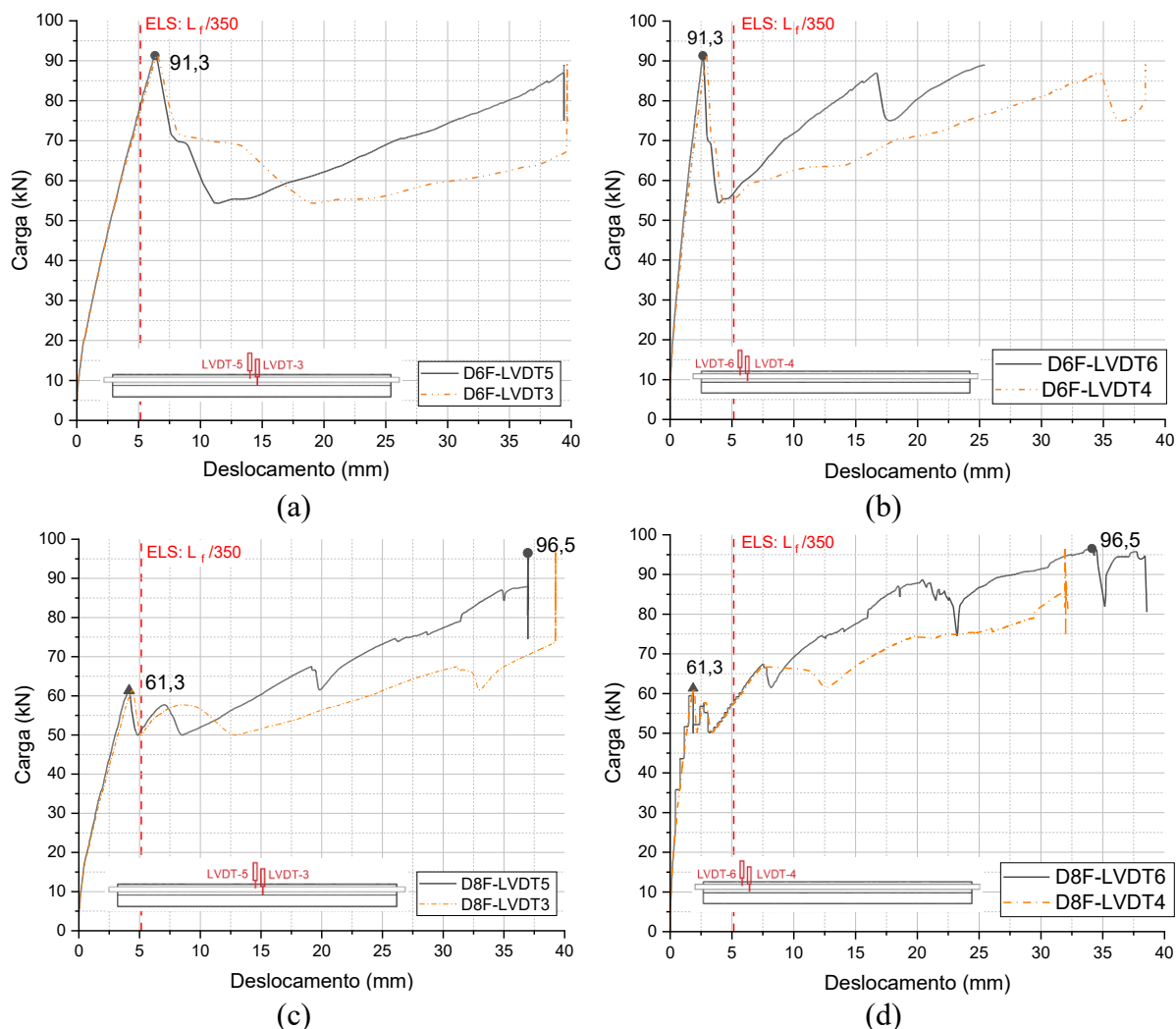


Figura 61 - Gráfico x deslocamento das lajes submetidas à flexão. (a) D6F eixo central; (b) D6F eixo lateral (c) D8F eixo central; (d) D8F eixo lateral.

A capacidade máxima da laje D8F e sua curva carga-deslocamento pode ser observada na Figura 61c para o eixo central e na Figura 61d para o eixo lateral. Observa-se um pico inicial de tensão a uma carga de 61,3 kN e deflexão central de 4,14 mm. Todavia, diferente do espécime D6F, após uma ligeira queda de capacidade de carga a resistência da laje continuou subindo, sendo a ruptura atingida após desprendimentos sucessivos da fôrma, começando pelas bordas longitudinais e progredindo para a nervura central superior.

A deflexão máxima medida pelos LVDTs instalados foi de 36,97 mm para a laje D8F e 39,67 mm para a laje D6F. Vale ressaltar que a capacidade de medição do LVDT foi atingida, conforme indicado pela linha vertical nos gráficos após a última medição de deslocamento. Durante o teste, observou-se que ocorreram deformações significativas até o final, com sons de aviso audíveis, demonstrando um comportamento pseudo-dúctil até a capacidade máxima.

O comportamento observado nos gráficos pode ser explicado pela natureza corrugada da laje. Apesar dos desprendimentos locais da laje, ainda existem regiões resilientes na laje que são progressivamente carregadas até a ruptura.

### 5.3.3. Deslizamentos horizontais

Em ambos os corpos de prova, foi observado o deslizamento horizontal entre o concreto e a fôrma de PRFV devido ao cisalhamento longitudinal. Os dados do deslizamento horizontal foram obtidos por meio da instrumentação da nervura central nas duas extremidades da fôrma, medindo o deslocamento relativo entre a chapa de aço fixada no concreto e o LVDT fixado na fôrma de PRFV, conforme previamente ilustrado na Figura 49.

As curvas carga-deslocamento que caracterizam o deslizamento da fôrma são apresentadas na Figura 62. Após atingir as cargas de destacamento informadas no item 5.3.2, observou-se o deslizamento relativo nas duas lajes, sugerindo que, embora o tratamento de revestimento de areia tenha promovido efetivamente a ação compósita entre o concreto e a fôrma, à medida que ocorreram deflexões, a área de contato e a porção aderida da fôrma diminuíram, resultando em maiores deslocamentos relativos entre os materiais. Ao final do teste foi aferido um deslizamento máximo de 24,39 mm para a laje D8F, enquanto a laje D6F teve um deslizamento de 19,06 mm.

Um comportamento semelhante foi documentado por Zuo *et al.* (2018) em seu estudo sobre conectores em forma de T e interfaces revestidas de areia. Esse comportamento é esperado para esse tipo de tratamento, pois depende do atrito para gerar ação conjunta.

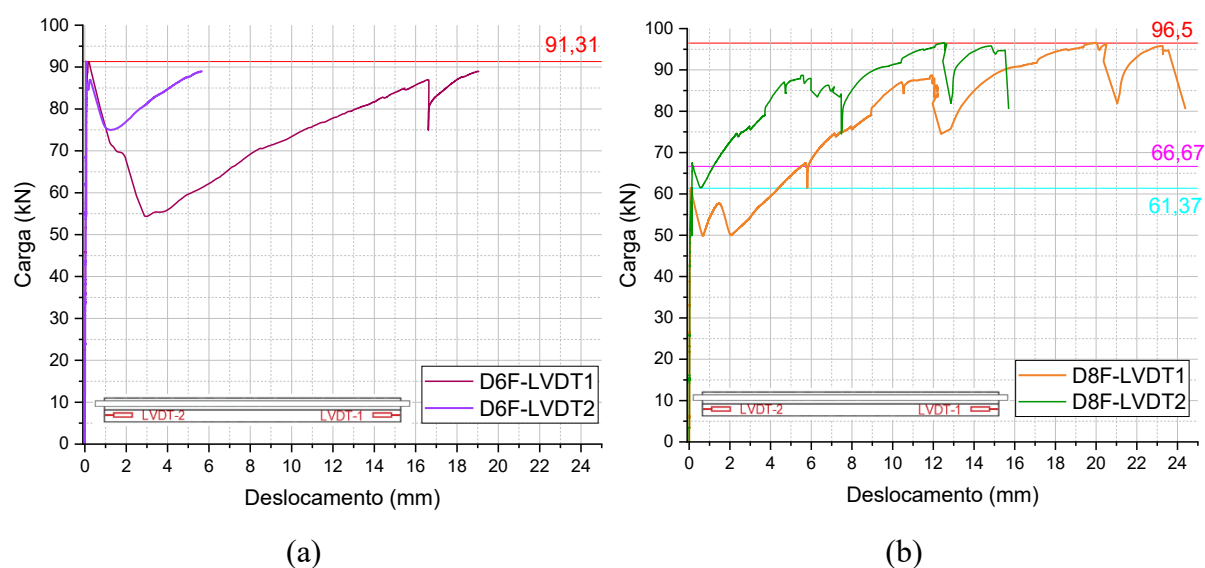


Figura 62 - Deslizamento horizontal entre o concreto e a fôrma. (a) Laje D6F; (b) Laje D8F.



#### 5.3.4. Deformações do concreto e fôrma

As deformações no eixo central e no eixo Ls (aplicação de carga) são apresentadas na Figura 63. Como pode ser observado, as lajes apresentaram um comportamento linear até a carga inicial de desprendimento da fôrma, após o qual o comportamento do material tornou-se não linear, com perda de rigidez, variação na posição da linha neutra e uma significativa taxa de crescimento das deformações.

A Figura 63a e Figura 63b ilustra as deformações encontradas na laje D6F até a ruptura. É possível observar que até a carga de destacamento 91,3 kN a estrutura comporta-se de maneira linear, com a linha neutra acima da fôrma, conseqüentemente tracionando a fôrma de PRFV por completo e comprimindo o concreto. Todavia, após o destacamento inicial da fôrma é possível observar uma mudança do comportamento registrado pelo extensômetro SG1 e SG3, fixados na nervura superior da fôrma, sendo comprimido devido a mudança da linha neutra, gerando grandes deformações. Próximo ao fim do ensaio é possível constatar por meio da Figura 63b que a nervura superior da fôrma experimentou uma variação significativa na deformação, passando de um estado comprimido para um estado tracionado, e retornando a um estado comprimido novamente ao atingir a carga de ruptura, rompendo por flexão e deformação justamente no eixo Ls, com a ruptura das fibras e dobra local da fôrma.

Uma configuração semelhante foi observada na nervura superior da laje D8F, o qual os gráficos de carga-deformação no eixo central e eixo Ls são apresentados por meio da Figura 63c e Figura 63d, respectivamente. Os gráficos revelam que, próximo à falha da laje D8F, a nervura superior também apresentou comportamento similar à nervura da laje D6F em dois pontos diferentes, atingindo sua capacidade máxima e ocasionando a ruptura da amostra. Sendo este comportamento consistente com o observado nos gráficos de carga-deslocamento e na deformação local no eixo central devido à flexão.

A distribuição de deformação ao longo do vão central da laje até o desprendimento inicial da fôrma de PRFV é representada na Figura 64, demonstrando um comportamento linear com uma posição fixa da linha neutra. No entanto, após o desprendimento inicial da fôrma, foram observadas mudanças notáveis na taxa de deformação, capacidade de carga e deslocamentos, destacando a necessidade de considerar uma ação totalmente compósita apenas até a carga de desprendimento. Isso ocorre devido à redução de rigidez causada pelo deslizamento relativo e ao aumento da carga, o que invalida a suposição de seção plana.

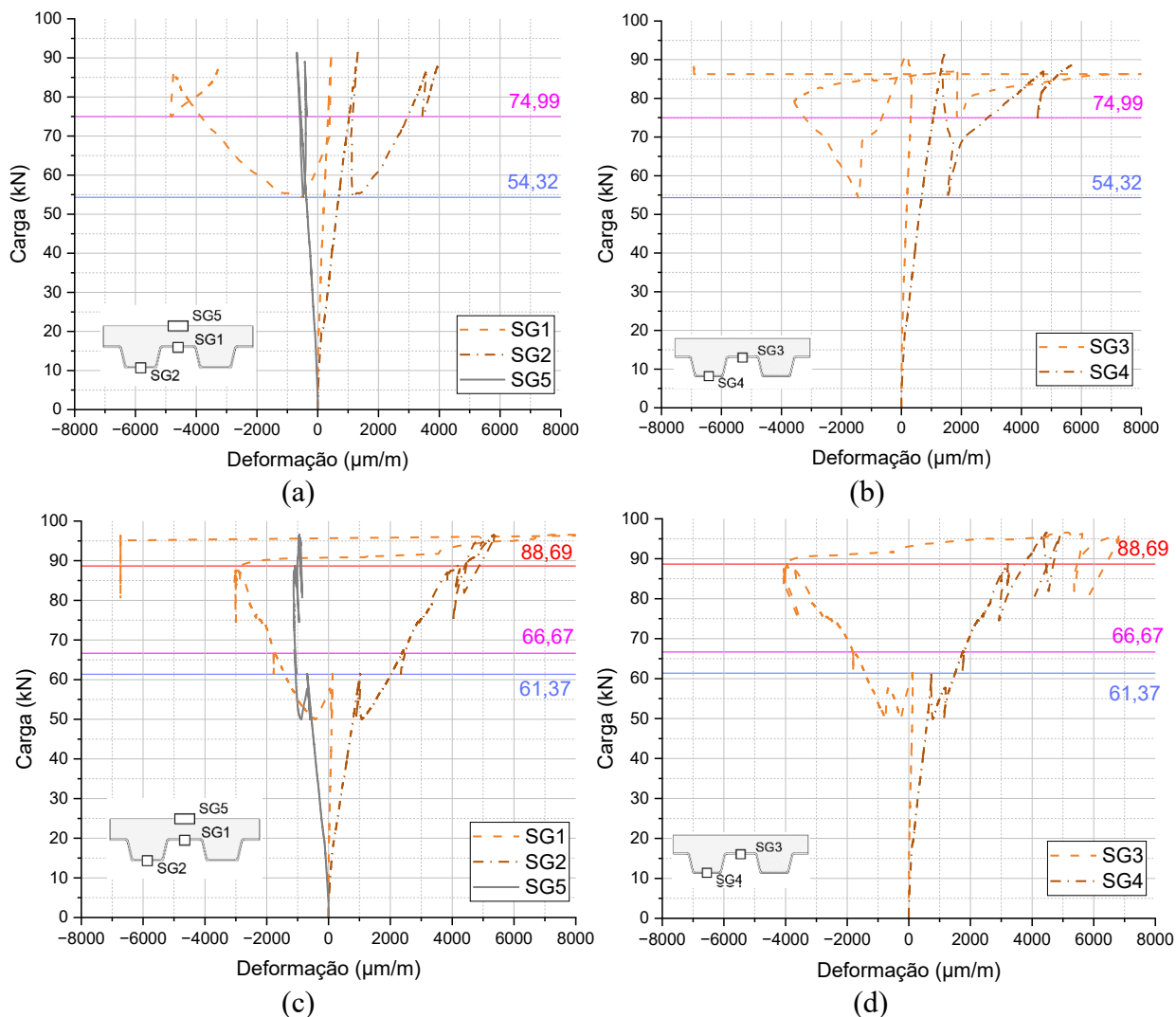


Figura 63 - Carga x Deformação. (a) D6F Eixo central; (b) D6F Eixo Ls; (c) D8F Eixo central; (d) D8F Eixo Ls.

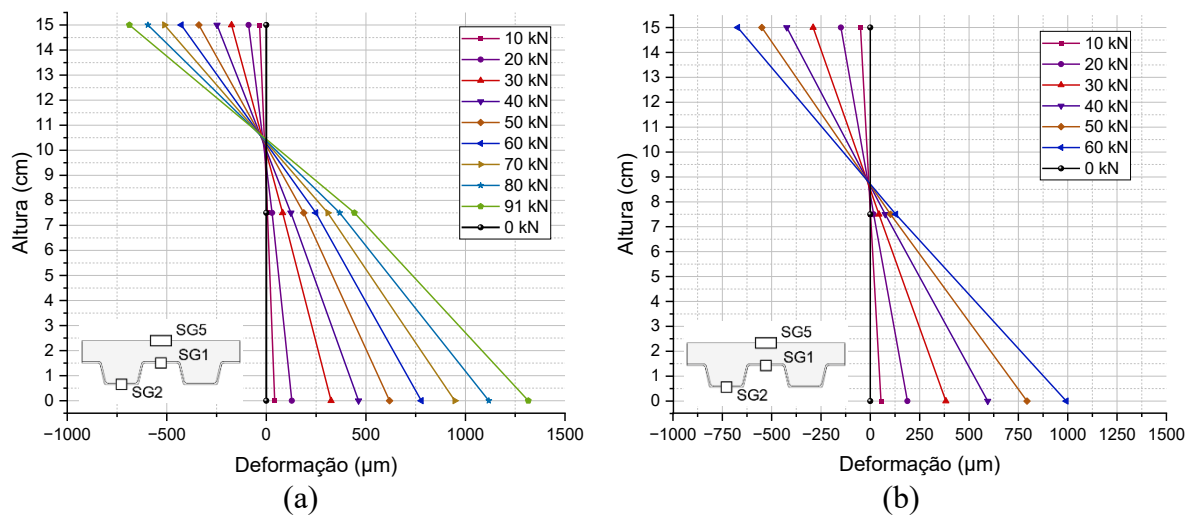


Figura 64 - Distribuição de tensão ao longo da seção transversal até o destacamento. (a) Laje D6F; (b) Laje D8F.

### 5.3.5. Efeito da espessura

A fôrma do espécime D6F apresentou uma redução de 25% na quantidade de fibra em relação a fôrma do espécime D8F. No entanto, sua capacidade de carga máxima foi apenas 2,77% inferior. Uma diferença significativa entre os dois tipos de lajes foi observada na carga de desprendimento da fôrma de PRFV, sendo que a laje D8F apresentou uma carga de desprendimento 32,86% menor em comparação com a laje D6F.

Em relação ao deslocamento, a fôrma D8F demonstrou uma deflexão de 4,14 mm, o que representa uma redução de 7,71% em comparação com a fôrma mais fina. Apesar do aumento da profundidade da linha neutra com o aumento da espessura da fôrma, a ação compósita requer uma maior rigidez ao cisalhamento. Neste estudo, considerando a configuração de aderência adotada, isso resultou em um desprendimento mais precoce da fôrma trapezoidal mais espessa, levando a cargas e deslocamentos menores.

Fang *et al.* (2016) também observaram um comportamento semelhante, onde maiores espessuras de revestimento de face de GFRP podem levar a falhas prematuras devido ao cisalhamento longitudinal. Boules, Fam e Genikomsou (2021) atribuem esse comportamento ao fato de que a área de contato entre a fôrma e o concreto contribui mais para o cisalhamento longitudinal do que a própria seção transversal da fôrma.

### 5.3.6. Análise da capacidade de carga

Com base no modelo de cálculo analítico detalhado no item 2.4, os dados coletados por meio da caracterização dos materiais e o resultado do ensaio de flexão à quatro pontos foram lançados no modelo proposto e os resultados teóricos finais foram comparados com resultados experimentais.

O modelo apresentado inicialmente foi seguido para determinar a capacidade de carga fatorada para o projeto, todavia foi necessária uma adaptação para os valores característicos para determinar a capacidade de carga não fatorada.

Para determinar a capacidade de carga característica, os fatores de segurança foram removidos dos cálculos de projeto, considerando apenas a compatibilidade de deformações de acordo com a equação(5) a (7).

Uma comparação entre o momento resistente não fatorado estimado ( $M_r$ ) e resistência real no desprendimento de teste ( $M_t$ ) é apresentada na Tabela 15. Os cálculos detalhados são apresentados no Apêndice A.

Tabela 15 - Comparação entre os momentos resistentes estimados e registrados

Laje	x (mm)	$M_{rd}$ (kN.m)	$M_r$ (kN.m)	$M_t$ (kN.m)	$M_t/M_r$	$M_{rd}/M_t$
D8F	62,50	14,75	21,67	13,79	0,64	1,06
D6F	46,25	18,60	27,36	20,54	0,75	0,90

Pode-se observar que, devido à posição da deformação efetiva, os momentos resistentes calculados variaram significativamente, sendo o momento resistente característico ( $M_r$ ) para as lajes superior ao de ensaio ( $M_t$ ). Dessa forma, apesar de possuir resultados similares, o modelo proposto não estimou adequadamente a resistência para a laje analisada.

Ao comparar o momento resistente ponderado ( $M_{rd}$ ), é possível verificar que os valores ponderados estavam mais próximos aos dados obtidos nos valores experimentais, com coeficientes de segurança próximos à um.

Baseando-se na equação (32) e (34) foi calculada a rigidez elástica linear para a laje mista utilizando o momento de inércia da seção homogeneizada fissurada, conforme pode ser visto na Figura 65, representada pela linha reta em azul. Para a comparação foi utilizada apenas a carga de ensaio e as deflexões medidas no meio do vão livre, tendo em vista que a deflexão devido ao peso próprio já havia ocorrido antes da medição dos deslocamentos.

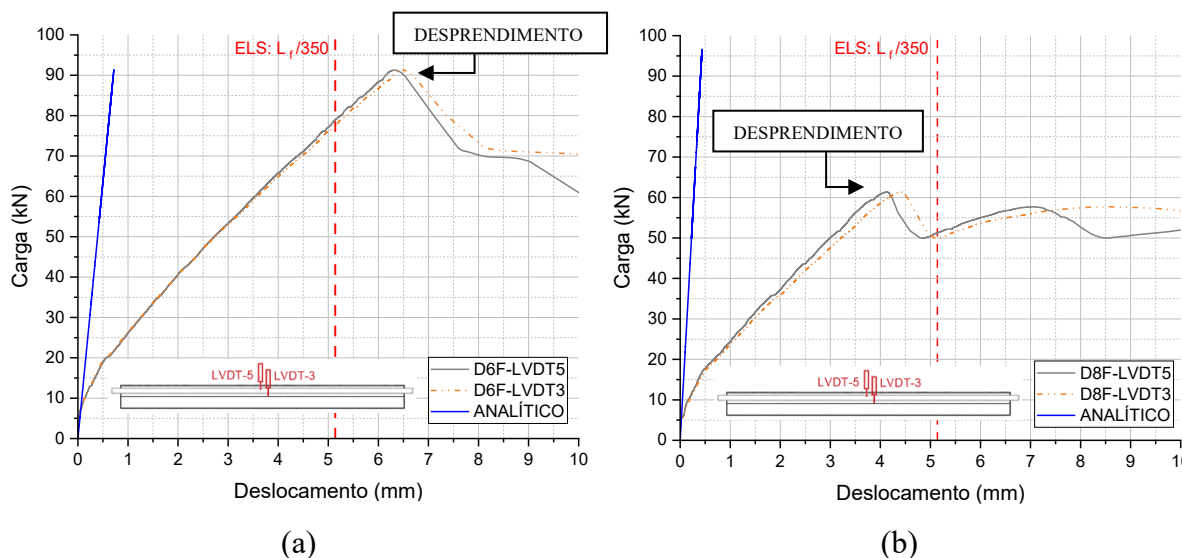


Figura 65 - Cálculo analítico da flecha com seção homogeneizada × resultados do ensaio até o destacamento da fôrma. (a) Carga × Deslocamento laje mista D6F; (b) Carga × Deslocamento laje mista D8F.

Nos gráficos apresentados na Figura 65 também pode ser verificado o momento em que a deflexão ultrapassava o máximo admitido para a fase final da laje, sendo igual a 5,14 mm. É possível verificar que por meio do cálculo analítico obtém-se uma estimativa não-conservadora

sobre os deslocamentos da laje mista. Uma forma de simplificar este comportamento é considerar apenas o momento de inércia da fôrma permanente ao calcular a rigidez elástica linear, obtendo flechas com valores mais próximos aos observados no ensaio, representado pela linha reta em azul na Figura 66, com os valores calculados e os resultados para os deslocamentos verticais aferidos no meio do vão livre.

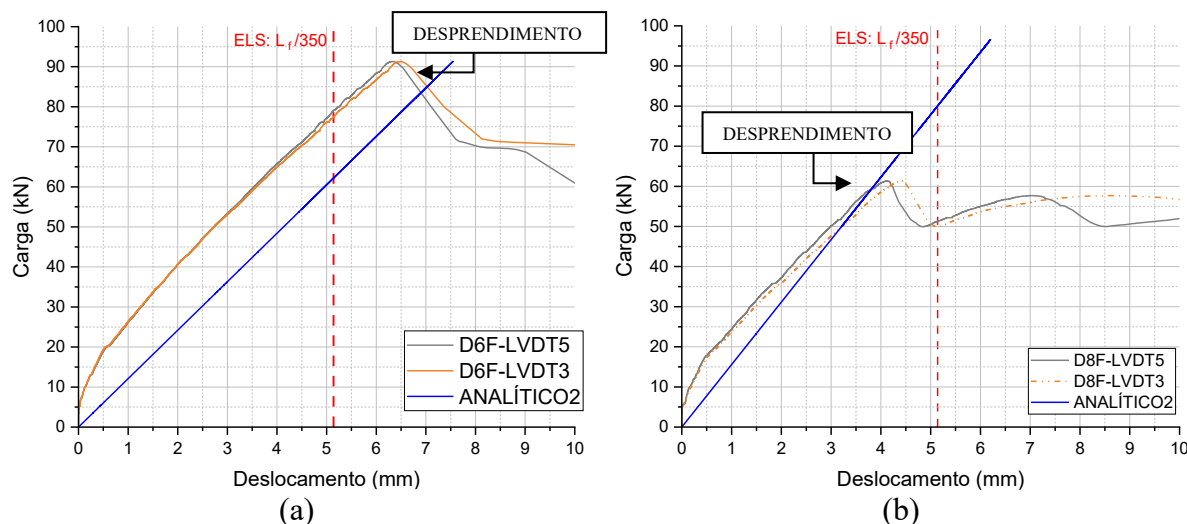


Figura 66 - Cálculo analítico da flecha considerando apenas a inércia da fôrma × resultados do ensaio até o destacamento. (a) Carga × Deslocamento laje mista D6F; (b) Carga × Deslocamento laje mista D8F

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na primeira parte deste capítulo foram explicitados os resultados iniciais para o pré-dimensionamento da estrutura utilizando o estudo analítico proposto no Capítulo 3. Na segunda parte foram apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados no programa experimental, de acordo com os ensaios detalhados no Capítulo 4. Na terceira parte deste capítulo foram explicitados os resultados do ensaio de flexão à quatro pontos, evidenciando o comportamento à flexão das lajes mistas de CARFA e PRFV.

Com base nos resultados obtidos, constata-se que as lajes mistas ensaiadas apresentaram um bom desempenho, atendendo ao estado limite último com um grande fator de segurança e também atendendo ao estado limite de serviço para o uso residencial.

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho abordou os conceitos fundamentais dos polímeros reforçados com fibras, abrangendo sua composição, características e processo de fabricação, concomitantemente foram apresentadas as propriedades do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e os benefícios de sua utilização.

Os principais trabalhos na literatura utilizando lajes mistas foram abordados, bem como uma nova interpretação para o dimensionamento no ELU e ELS, definindo parâmetros de análise para o programa experimental realizado.

Todos os materiais principais como PRFV e CARFA foram produzidos e caracterizados na Universidade de Brasília, com os dados de caracterização explicitados nos resultados experimentais. Dessa forma, apresentam-se, neste capítulo, as conclusões dos resultados experimentais obtidos por meio do desenvolvimento do programa experimental.

### 6.1. PRODUÇÃO DAS FÔRMAS PERMANENTES DE PRFV

Neste trabalho foi desenvolvido de forma pioneira no grupo *Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures (CMRSS)*, um sistema de infusão de resina com o auxílio do vácuo para a produção de placas de PRFV com geometrias não-planas, de grandes comprimentos e com resistências à tração estimadas entre 741 a 748 MPa. As seguintes conclusões podem ser obtidas por meio da fabricação das fôrmas:

1. A orientação das fibras principais influencia diretamente o fluxo de resina;
2. Para maiores densidades de fibras faz-se necessário um estudo adicional do fluxo de infusão e da viscosidade da resina, devendo ser analisados os tipos de materiais empregados e a necessidade ou não de diluição para viabilizar a fabricação;
3. O desenvolvimento de fôrmas permanentes por meio do sistema de infusão de resina com o auxílio do vácuo pode ser considerado como um método de produção inicial para a caracterização mecânica, evitando o desenvolvimento de sistemas como o de pultrusão antes de realizar testes em escala com a fôrma final;
4. Observou-se uma baixa taxa de produtividade utilizando sistema de infusão de resina com o auxílio do vácuo. Em virtude disso a sua utilização deve ser ponderada em relação aos processos mecanizados, pois em situações em que são necessárias uma quantidade maior de corpos de prova, este método pode se tornar economicamente inviável;

5. A técnica empregada para fabricação viabiliza utilizar uma mescla entre diferentes tipos de fibra, posicionamentos e orientações, desde que analisadas a compatibilidade entre os materiais e o comportamento do fluxo de infusão;

6. O sistema de produção desenvolvido torna possível a adaptação para novas geometrias, promovendo assim a produção mais acessível de estruturas mistas para as pesquisas realizadas pelo grupo CMRSS, desvinculada aos perfis comerciais existentes.

## 6.2. CONCLUSÕES A RESPEITO DO ESTUDO ANALÍTICO

Existem diversos desafios intrínsecos tanto à escolha dos materiais utilizados para o reforço à tração quanto à configuração de uma laje com fôrma permanente e caráter estrutural. Essas complexidades abrangem questões como a heterogeneidade e anisotropia do PRFV, a interligação entre os elementos, a ação compósita resultante dos materiais empregados, o comportamento sob cargas ao longo do tempo e o padrão de ruptura manifestado.

Diante dessa diversidade de desafios, optou-se por conduzir um estudo analítico de natureza simplificada. Esse estudo baseou-se nas diretrizes delineadas na norma ACI 440.2R (2017), com insights também advindos da ABNT NBR 8.800 (2008). No entanto, é importante ressaltar que o método adotado possui limitações inerentes e implicações que demandam considerações aprofundadas, tais como:

1. O estudo não leva em consideração os tipos de conexões entre o concreto e a fôrma permanente, assumindo que a mesma possui uma ação compósita até sua capacidade final;
2. Não foram realizadas considerações a respeito da ruptura por cisalhamento longitudinal, sendo um tipo de falha conhecida para lajes mistas;
3. Os resultados ponderados se aproximaram mais das cargas aferidas no ensaio de flexão à quatro pontos quando comparados aos resultados característicos do método proposto, estando esse último contra a segurança.
4. A rigidez elástica linear calculada utilizando o momento de inércia da seção homogeneizada estima flechas muito inferiores às aferidas experimentalmente, sendo uma alternativa simplificada utilizar apenas a rigidez da fôrma permanente para estimar as flechas da estrutura de uma forma mais conservadora.

Em virtude aos dados expostos, considera-se o resultado a respeito do estudo analítico aceitáveis, com valores próximos aos encontrados nos dados experimentais. Não obstante, faz-

se necessário aprimorações do método proposto, adicionando aspectos como os tipos de conexões e formas adicionais de ruptura.

### 6.3. RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE FLEXÃO

Este estudo propôs e investigou experimentalmente uma laje mista inovadora de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço e uma fôrma permanente trapezoidal de polímero reforçado com fibras de vidro. O comportamento em flexão da laje mista proposta foi avaliado experimentalmente, com variação na espessura da fôrma de 4,20 mm e 5,28 mm. As seguintes conclusões podem ser obtidas a partir dos resultados deste estudo experimental:

1. O desempenho estrutural da laje é influenciado principalmente pela ação compósita entre a fôrma e o concreto, especialmente por meio do cisalhamento longitudinal;
2. A resposta carga-deslocamento das lajes apresentou um comportamento linear apenas até atingir a carga inicial de desprendimento, com ação completamente compósita;
3. A laje D8F, com uma fôrma mais espessa, apresentou uma maior capacidade de carga última em comparação com a laje D6F, que tinha uma fôrma mais fina. No entanto, a diferença na capacidade de carga foi relativamente pequena, com a laje D6F atingindo 97,23% da capacidade de carga da laje D8F;
4. A carga de desprendimento da fôrma permanente foi significativamente influenciada pela espessura da fôrma. A laje D8F experimentou uma carga de desprendimento 32,86% menor em comparação com a laje D6F. Além disso, a laje D8F apresentou desprendimento a um deslocamento de 4,14 mm, que foi 7,71% menor do que o da laje D6F;
5. A presença da fôrma trapezoidal e o tratamento com revestimento de areia geraram forças de atrito que contribuíram para o comportamento compósito e a capacidade de carga das lajes. No entanto, é importante otimizar o tratamento da superfície para aumentar ou prevenir o desprendimento das fôrmas, pois isso pode afetar significativamente o desempenho das lajes;
6. Ambos os corpos de prova mostraram uma capacidade de reserva de carga significativa após o início do desprendimento da fôrma. Isso indica que mesmo após o desprendimento inicial, as lajes foram capazes de sustentar carga adicional antes de atingir a falha última, com um comportamento pseudo-dúctil. Essa capacidade de reserva de carga demonstra o potencial para um desempenho estrutural aprimorado e a capacidade de suportar cargas similares ou até mesmo maiores do que a carga de desprendimento inicialmente observada.



#### 6.4. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A viabilidade de utilização de fôrmas permanentes trapezoidais com concreto com fibras foi demonstrada neste trabalho, junto às comprovações adicionais da literatura. Todavia, ainda há diversos caminhos que devem ser seguidos para a utilização comercial desta configuração, devendo haver um equilíbrio entre segurança, durabilidade, sustentabilidade e viabilidade financeira. Dessa forma, a seguir serão listadas sugestões de trabalhos futuros nesta linha de pesquisa:

- Estudo considerando o comportamento dinâmico e análise de fadiga da laje apresentada;
- Avaliação do impacto na modificação do tipo de fibra e suas orientações de montagem na resistência individual da fôrma e global da estrutura mista;
- Investigação do comportamento ao cisalhamento longitudinal utilizando conectores PERFOFRP para promover a aderência mecânica, comparados os conectores de atrito e químicos por meio do ensaio de *pushout*;
- Proposta de modelo de dimensionamento que englobe não apenas a flexão, mas o cisalhamento longitudinal e transversal com conectores físicos e químicos;
- Estudos de durabilidade com exposição prolongada às intempéries;
- Análise do comportamento à punção e aos momentos negativos;
- Uso de fôrmas permanentes como reforço utilizando fibras e/ou resinas naturais, focando na sustentabilidade e reciclagem do sistema;
- Utilização de fibras estruturais não-metálicas como substituição ao CARFA e o impacto na ductibilidade e resistência das lajes mistas;
- Confeção e análise de lajes contínuas e/ou com maiores larguras/nervuras;
- Desenvolvimento de análise numérica virando otimizar a seção transversal e conexão longitudinal, aumentando a capacidade de carga final do elemento;
- Avaliação do comportamento ao fogo de lajes mistas tendo como parâmetro a variação dos tipos de conectores.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5.739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6.120 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.800 - Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14.762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro: 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.696 – Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos**. Rio de Janeiro: 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.823-2 - Concreto autoadensável - Parte 2 Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.935 - Projeto de estruturas de concreto reforçados com fibras - Procedimento**. Rio de Janeiro: 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.940 - Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: 2021.

ACI, American Concrete Institute. **ACI 440.1R - Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars**. American Concrete Institute, 2015.

ACI, American Concrete Institute. **ACI 440.2R - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. American Concrete Institute, 2017.

ACI, American Concrete Institute. **ACI 440R - Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) reinforcement for concrete structures**. Farmington Hills: ACI, 2007.

AHMAD, Jawad; MANAN, Aneel; ALI, Asif; KHAN, M. Walled; ASIM, M.; ZAID, Osama. A study on mechanical and durability aspects of concrete modified with steel fibers (SFS). **Civil Engineering and Architecture**, v. 8, n. 5, p. 814–823, 2020.

ASCIONE, Luigi; CARON, Jean-François; GODONOU, Patrice; IJELMUIJDEN, Kees; KNIPPERS, Jan; MOTTRAM, Toby; OPPE, Mathias; SORENSEN, Morten; TABY, Jon; TROMP, Liesbeth. **Prospect for new guidance in the design of FRP : support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes**. Publications Office, 2016.

ASTM, American Society for Testind and Materials. **D 3039/D 3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. 2017.

BARROS, Joaquim; MORAES NETO, Bernado; MELO, Guilherme; FRAZÃO, Cristina. Assessment of the effectiveness of steel fibre reinforcement for the punching resistance of flat slabs by experimental research and design approach. **Composites Part B: Engineering**, v. 78, p. 8–25, 2015.

BATTISTA, Ronaldo C.; PFEIL, Michèle S.; CARVALHO, Eliane MI L. Fatigue life estimates for a slender orthotropic steel deck. **Journal of Constructional Steel Research**, v 64. 2008.

BOULES, Philopateer; FAM, Amir; GENIKOMSOU, Aikaterini S. Concrete Floor with GFRP-Embedded I-Beams and Stay-in-Place Structural Forms. **Journal of Composites for Construction**, v. 25, n. 2, 2021.

BOULES, Philopateer; GENIKOMSOU, Aikaterini S; JAWDHARI, Akram; FAM, Amir. Modeling of a concrete floor incorporating GFRP Stay-in-Place structural form. **Engineering Structures**, v. 278, 2023.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 9ª Edição. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

CANALLI, Isabel Calegari. **Estudo do comportamento de estrutura mista de concreto e perfil pultrudado de PRFV sob flexão**. 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC., 2010.

CARDOSO, Matheus Galvão. **Contribuições para dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras pelo método do empacotamento compressível**. 2020. 1–167 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials: Science and Engineering**. Third Editioned. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2012. *E-book*. Disponível em: [www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com).

CHO, Jeong-Rae; CHO, Keunhee; PARK, Sung Yong; KIM, Sung Tae; KIM, Byung-Suk. Bond characteristics of coarse sand coated interface between stay-in-place fibre-reinforced

polymer formwork and concrete based on shear and tension tests. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 37, n. 5, p. 706–718, 2010.

CHO, Keunhee; CHO, Jeong-Rae; CHIN, Won-Jong; KIM, Byung-Suk. Bond-slip model for coarse sand coated interface between FRP and concrete from optimization technique. **Computers and Structures**, v. 84, n. 7, p. 439–449, 2006.

FAM, Amir; NELSON, Mark. New Bridge Deck Cast onto Corrugated GFRP Stay-in-Place Structural Forms with Interlocking Connections. **Journal of Composites for Construction**, v. 16, n. 1, p. 110–117, 2012.

FANG, Hai; XU, Xin; LIU, Weiqing; QI, Yujun; BAI, Yu; ZHANG, Bing; HUI, David. Flexural behavior of composite concrete slabs reinforced by FRP grid facesheets. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 92, p. 46–62, 2016.

FAVARATO, Lucas Fadini. **On the composite behavior of a rebar truss ribbed slab with incorporated shuttering made of lipped channel section**. Master's thesis. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 248p f. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GAI, Xian; DARBY, Antony; IBELL, Tim; EVERNDEN, Mark. Experimental investigation into a ductile FRP stay-in-place formwork system for concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 1013–1023, 2013.

GOMES, Frederico Pimentel. **Curso experimental de estatística**. 15ª edição. [S. l.]: Piracicaba: FEALQ, 2009.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009.

GONILHA, José A.; CORREIA, João R.; BRANCO, Fernando A. Structural behaviour of a GFRP-concrete hybrid footbridge prototype: Experimental tests and numerical and analytical simulations. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 60, p. 11–22, 2014.

GOYAL, Reema; MAJHI, Subhra; MUKHERJEE, Abhijit; GOYAL, Shweta. FRP Stay-in-Place Formworks for High Performance of Concrete Slabs. **Journal of Composites Science**. v. 6, n. 10, 2022.

GOYAL, Reema; MUKHERJEE, Abhijit; GOYAL, Shweta. An investigation on bond between FRP stay-in-place formwork and concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 113, p. 741–751, 2016.

HADIGHEH, S. A.; KASHI, S. Effectiveness of vacuum consolidation in bonding fibre reinforced polymer (FRP) composites onto concrete surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 854–864, 2018.

HE, Jun; LIU, Yuqing; CHEN, Airong; DAI, Liang. Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 49–64, 2012.

HONICKMAN, Hart Noah. **Pultruded GFRP Sections as Stay-in-Place Structural Open Formwork for Concrete Slabs and Girders**. 2008. Master's thesis - Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.

JEONG; Young-Soo; KAINUMA, Shigenobu; AHN, Jin-He. Structural response of orthotropic bridge deck depending on the corroded deck surface. **Construction and Building Materials**, V43. 2013.

JOSE, Josmin P; MALHOTRA, Sant K.; THOMAS, Sabu; JOSEPH, Kuruvilla; GODA, Koichi; SREEKALA, Meyyarappallil S. Introduction to Polymer Composites. *Em: POLYMER COMPOSITES*. [S. l.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2012. v. 1.

KARBHARI, V.; CHIN, J.; HUNSTON, D.; BENMOKRANE, B.; JUSKA, T.; MORGAN, R.; LESKO, M. J. J.; SORATHIA, U.; REYNAUD, D. Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. **Journal of Composites for Construction**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 238–247, 2003.

KOSSAKOWSKI, Paweł Grzegorz; WCISLIK, Wiktor. Fiber-Reinforced Polymer Composites in the Construction of Bridges: Opportunities, Problems and Challenges. **Fibers**, [s. l.], v. 10, n. 4, 2022.

LAMEIRAS, Rodrigo; VALENTE, Isabel; BARROS, Joaquim; AZENHA, Miguel; GONÇALVES, Cláudia. Pull-out behaviour of Glass-Fibre Reinforced Polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part I: Experimental program. **Construction and Building Materials**. v. 162, p. 155–169, 2018a.

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim; VALENTE, Isabel; XAVIER, José; AZENHA, Miguel. Pull-out behaviour of glass-fibre reinforced polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part II: Prediction of load carrying capacity. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 169, p. 142–164, 2018b.

MACHADO, Joana Maria Leal. **Estudo da ligação entre componentes estruturais de GFRP (glass fiber reinforced polymer) e componentes estruturais em betão**. 2015. Dissertação de Mestrado - Universidade do Minho, [s. l.], 2015.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2019. *E-book*. Disponível em: [www.artliber.com.br](http://www.artliber.com.br).

MASTALI, Mohammad; BARROS, Joaquim A. O.; VALENTE, Isabel B. Laje sandwich em polímero reforçado com fibra de vidro e argamassa de ultra elevada ductilidade para a reabilitação estrutural. **Anais [...]**. [S. l.]: 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. CRC Press, 2002.

MUC, A.; STAWIARSKI, A.; CHWAŁ, M. Design of the hybrid FRP/concrete structures for bridge constructions. **Composite Structures**, [s. l.], v. 247, 2020.

NELSON, M.; FAM, A.; BUSEL, J.; BAKIS, C.; NANNI, A.; BANK, L.; HENDERSON, M.; HANUS, J. Fiber-reinforced polymer stay-in-place structural forms for concrete bridge decks: State-of-the-art review. **ACI Structural Journal**, [s. l.], v. 111, n. 5, p. 1069–1080, 2014.

NELSON, Mark; FAM, Amir. Structural GFRP Permanent Forms with T-Shape Ribs for Bridge Decks Supported by Precast Concrete Girders. 2013.

NELSON, Mark; ELDRIDGE, Amanda; FAM, Amir. The effects of splices and bond on performance of bridge deck with FRP stay-in-place forms at various boundary conditions. **Engineering Structures**, v. 56, p. 509–516, 2013.

NELSON, Mark; FAM, Amir. Full bridge testing at scale constructed with novel FRP stay-in-place structural forms for concrete deck. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 50, p. 368–376, 2014.

NGUYEN, Ngoc Tan; BUI, Tan Trung; BUI, Quoc Bao. Fiber reinforced concrete for slabs without steel rebar reinforcement: Assessing the feasibility for 3D-printed individual houses. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, 2022.

OLIVA, Michael; BANK, Lawrence; BAE, Han-Ug; BARKER, Jeffrey; YOO, Seung-Woon. FRP Stay-In-Place formwork and reinforcing for concretet highway bridge decks. *Em: 2007, Greece*. **Anais [...]**. Greece: International Symposium on Fiber Reinforces Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2007.

OLIVEIRA, André Manuel Correia. **Caracterização de painéis sanduíche híbridos para a reabilitação de pisos de edifícios**. 2018. 1–272 f. Dissertação de Mestrado - Universidade do Minho, 2018.

ORTENZI JÚNIOR, Altibano. **A Fibra de Vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e Seu Uso Estrutural em Construção Civil - O Estado-da-arte**". 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

PAJAK, M.; PONIKIEWSKI, T. **Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers**. 2013.

PAUL, Justin; CRIADO, Alex Rialp. The art of writing literature review: What do we know and what do we need to know?. **International Business Review**, [s. l.], v. 29, n. 4, 2020.

PEREIRA, Eric Vallotti. **Influência de fibras de aço no comportamento mecânico e nos mecanismos de fissuração de concretos autoadensáveis**. 2017. 1–170 f. Master's thesis - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

POURNASIRI, Emad; PHAM, Thong M.; HAO, Hong. Structural performance evaluation of UHPC/conventional concrete cast on new Y-shape FRP stay-in-place formwork for concrete bridge decks. **Structures**, [s. l.], v. 41, p. 1077–1091, 2022.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexander Galvão. **Estruturas Mistas**. Vol 1, 2ª edição. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.

QURESHI, Jawed. **A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges**. MDPI, 2023.

RAJAK, Dipen; PAGAR, Durgesh; MENEZES, Pradeep; LINUL, Emanoil. **Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications**. MDPI AG, 2019.

RILEM, Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. **TC 162-TDF: Test and Design Methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test**. *Materials and Structures*, v 35, 579-582. 2002.

SANTOS NETO, Almir Barros da S. **Desenvolvimento de um sistema de laje mista de concreto com perfis pultrudados de materiais compostos avançados**. 2006. 1–258 f. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SENA-CRUZ, José; CORREIA, Luís; RIBEIRO, Filipe; FIGUEIRA, Diogog; BENZO, Pier; BARROS, Joaquim; PEREIRA, Eduardo; VALENTE, Isabel. The effect of surface treatment and environmental actions on the adhesive connection between GFRP laminate surface and fresh FRC. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 258, 2020.

SHIMOSAKA, Tobias Jun. **Influência do Teor de Diferentes Tipos de Fibras de Aço em Concretos Autoadensáveis**. 2017. 121p f. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

SIEG, Ana Paula Antonello. **Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada**. 2015. 143p. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, escola de engenharia de São Carlos. São Carlos, 2015.

SILVA, John Kennedy Fonsêca. **Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo Perfofrp em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado**. 1–80 f. Master's thesis - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SIWOWSKI, Tomasz; RAJCHEL, Mateusz. Structural performance of a hybrid FRP composite – lightweight concrete bridge girder. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 174, 2019.

SIWOWSKI, Tomasz; RAJCHEL, Mateusz; WLASAK, Lech. Experimental study on static and dynamic performance of a novel GFRP bridge girder. **Composite Structures**, [s. l.], v. 259, 2021.

VELASCO, Reila Vargas. **Concretos Auto-Adensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas**. 2008. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

WEIBULL, Jon Karl; BASTOS, Cristiane Cruxen Daemon d Oliveira; OLIVEIRA, Luiz Octavio de Souza Bueno. Análise Modal e Dimensionamento de uma Passarela de Concreto com GFRP. **Anais [...]**. [S. l.]: XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2021.

YOU, Young-Jun; KIM, Jang-Ho; PARK, Ki-Tae; SEO, Dong-Woo; LEE, Tae-Hee. Modification of rule of mixtures for tensile strength estimation of circular GFRP rebars. **Polymers**, [s. l.], v. 9, n. 12, 2017.

ZHANG, Pu; HU, Yi; PANG, Yuyan; FENG, Hu; GAO, Danying; ZHAO, Jun; SHEIKH, Shamin Ahmed. Influence factors analysis of the interfacial bond behavior between GFRP plates, concrete. **Structures**, v 26. 2020.

ZHU, Zhiwen; XIANG, Ze; ZHOU, Edward. Fatigue behavior of orthotropic steel bridge stiffened with ultra-high performance concrete layer. **Journal of Constructional Steel Research**, v157. 2019.

ZOGHI, Manoochehr. **The international Handbook of FRP Composites in civil engineering**: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. *E-book*. Disponível em: [www.TechnicalBooksPdf.com](http://www.TechnicalBooksPdf.com).



ZOU, Xingxing; LIN, Hongwei; FENG, Peng; BAO, Yi; WANG, Jingquan. **A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications**. Elsevier Ltd, 2021.

ZUO, Yize; CAO, Yuqi; ZHOU, Yuqi; LIU, Wei Wei. **A State-of-the-Art Review on Hybrid GFRP-Concrete Bridge Deck Systems**. Hindawi Limited, 2021.

ZUO, Yize; MOSALLAM, Ayman; XIN, Haohui; LIU, Yuqing. JE, Jun. Flexural performance of a hybrid GFRP-concrete bridge deck with composite T-shaped perforated rib connectors. **Composite Structures**, v. 194, p. 263–278, 2018.

ZUO, Yize; LIU, Yuqing; HE, Jun. Experimental investigation on hybrid GFRP-concrete decks with T-shaped perforated ribs subjected to negative moment. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 728–741, 2018.

## 8. APÊNDICE A – CÁLCULOS ANALÍTICOS REALIZADOS

### 8.1. CÁLCULO ANALÍTICO PONDERADO D6F

#### 8.1.1. Dados iniciais

Para o cálculo analítico ponderado foram utilizadas as propriedades do PRFV coletadas nos ensaios de caracterização, sendo estas a resistência última à tração na direção principal à 0° e na direção perpendicular à 90°, bem como o módulo de elasticidade deste material. Como parte dos dados iniciais de cálculo também foi incorporado o valor da resistência à compressão do concreto do espécime em estudo, sendo todos os valores utilizados informados na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados de entrada para os cálculos

Descrição	Símbolo		Valor	Und
Deformação última de ruptura	$\varepsilon_{fu}^*$	=	0,023	mm/mm
Resistência última à tração	$F_{fu}^*$	=	760,04	N/mm <sup>2</sup>
Resistência última à tração na transversal	$F_{fu}^{*,t}$	=	93,79	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	$E_f$	=	33.090	MPa
Espessura nominal da fôrma de PRFV	$t_f$	=	4,00	mm
Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra	$x$	=	46,25	mm
Resistência à compressão do concreto	$f_{ck}$	=	26,89	MPa
Seção transversal efetiva	$A_{ef}$	=	2.708	mm <sup>2</sup>
Comprimento Vão	$L_f$	=	1,80	m

#### 8.1.2. Ponderação da resistência do PRFV

##### 8.1.2.1. Coeficiente de ponderação devido à exposição ambiental

Foi calculado a ponderação devido a exposição ambiental por meio da (40) e (41), levando em consideração os dados iniciais expostos na Tabela 16.

$$f_{fu} = 0,75 \cdot 760,04 = 570,03 \text{ N/mm}^2 \quad (65)$$

$$\varepsilon_{fu} = 0,75 \cdot 0,023 = 0,0172 \text{ mm/mm} \quad (66)$$

### 8.1.2.2. Resistência nominal à flexão

À partir do valor encontrado para  $\varepsilon_{fu}$  foi calculada a ponderação considerada na resistência nominal à flexão, por meio da deformação de destacamento ( $\varepsilon_{fd}$ ) calculada na (42), e deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) calculada na (43).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{26,89}{3 \cdot 33.090 \cdot 4}} \leq 0,9 \cdot 0,0172 \quad \therefore \varepsilon_{fd} = 0,0034 \text{ mm/mm} \quad (67)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{109 - 46,25}{46,25} \right) \leq 0,0034 \quad \therefore \varepsilon_{fe} = 0,0034 \text{ mm/mm} \quad (68)$$

Dessa forma, a tensão máxima de tração ponderada  $f_{fe,d}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe,d} = E_f \varepsilon_{fe} = 33.090 \cdot 0,0034 = 111,64 \text{ MPa} \quad (69)$$

### 8.1.2.3. Resistência nominal ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento foi ponderada de acordo com a (45) a (50).

$$L_e = \frac{23,300}{(4 \cdot 33.090)^{0,58}} = 24,93 \quad (70)$$

$$k_1 = \left( \frac{26,89}{27} \right)^{2/3} = 1,00 \quad (71)$$

$$k_2 = \frac{109 - 24,93}{109} = 0,77 \quad (72)$$

$$\kappa_v = \frac{1,00 \cdot 0,77 \cdot 24,93}{11,900 \cdot 0,0172} \leq 0,75 \quad \therefore \kappa_v = 0,03 \quad (73)$$

$$\varepsilon_{fe,v} = 0,03 \cdot 0,0172 \leq 0,004 \quad \therefore \varepsilon_{fe,v} = 0,0005 \text{ mm/mm} \quad (74)$$

Dessa forma, a tensão resistente de cisalhamento ponderada  $f_{fe,v}$  adotada será:

$$f_{fe,v} = E_f \varepsilon_{fe,v} = 33.090 \cdot 0,0005 = 15,82 \text{ MPa} \quad (75)$$

## 8.1.3. Verificação da laje mista na fase final

### 8.1.3.1. Determinação do momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente leva em conta os esforços internos na seção transversal. Como o somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, tomou-se a força de tração na fôrma  $N_{frp}$  como parâmetro para o cálculo do momento resistente, conforme (51) a (53).

$$N_{frp} = A_{ef} \cdot f_{fe,d} = 2.708 \cdot 111,64 = 302,33 \text{ kN} \quad (76)$$

$$y_I = 109 - 0,8 \cdot 46,25 \cdot 0,5 = 90,50 \text{ mm} \quad (77)$$

$$M_r = \psi_f \cdot N_{frp} \cdot y_i = 302,33 \cdot 90,50 \cdot 10^{-3} = 23,26 \text{ kN.m} \quad (78)$$

$$M_{rd} = \phi \cdot M_r = 0,8 \cdot 23,26 = 18,60 \text{ kN.m} \quad (79)$$

### 8.1.3.2. Verificação entre o momento resistente e o momento solicitante

A verificação entre o momento resistente e o momento solicitante foi realizada por meio de três etapas construtivas, sendo para o Estado Limite Último nas condições Normais ( $M_{sd,ELU-N}$ ) e nas condições Construtivas ( $M_{sd,ELU-C}$ ), bem como no Estado Limite de Serviço ( $M_{sd,ELS}$ ). A equação de base para esses cálculos é apresentada na equação (80).

$$M_{sd} = \frac{q_{sd} \cdot L_f^2}{8} \quad (80)$$

Para calcular  $M_{sd,ELU-N}$  foi considerado que todo o carregamento é suportado pela laje mista, sendo utilizada a carga do peso próprio do concreto, forro e revestimento, bem como a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (81).

$$M_{sd,ELU-N} = \frac{\{(1,3 \cdot 1,42) + [1,5 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,5 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8^2}{8} = 1,64 \text{ kN.m} \quad (81)$$

Para calcular  $M_{sd,ELU-C}$  foi levada em consideração as cargas de peso próprio do concreto e sobrecarga de construção, conforme a equação (82).

$$M_{sd,ELU-C} = \frac{[(1,2 \cdot 1,42) + (1,3 \cdot 0,54)] \cdot 1,8^2}{8} = 0,97 \text{ kN.m} \quad (82)$$

Para calcular o momento ponderado no estado limite de serviço na fase construtiva ( $M_{sd,ELS-C}$ ) foi considerado o carregamento antes da carga construtiva, ou seja, apenas o peso próprio do concreto e a sobrecarga construtiva, conforme a equação (83).

$$M_{sd,ELS-C} = \frac{[(1,0 \cdot 1,42) + (1,0 \cdot 0,54)] \cdot 1,8^2}{8} = 0,79 \text{ kN.m} \quad (83)$$

Para calcular o momento ponderado no estado limite de serviço na fase final ( $M_{sd,ELS-F}$ ) foi considerado o carregamento após a carga construtiva, ou seja, sem o peso próprio do concreto. Dessa forma, somaram-se o peso próprio do forro, revestimento e a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (83).

$$M_{sd,ELS} = \frac{\{[1,0 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,0 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8^2}{8} = 0,60 \text{ kN.m} \quad (84)$$

Com base nos resultados encontrados nas equações (81), (82) e (83). Os valores podem ser comparados com o valor resistente calculado por meio da equação (78), sendo possível verificar que o esforço resistente é maior do que o esforço solicitante.

#### 8.1.3.3. Determinação da resistência ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento da laje com fôrma trapezoidal de PRFV foi determinada por meio da (55) a (60)

$$V_c = \frac{63 \cdot \sqrt[3]{26,89^2} \cdot 21.817,09}{1,4 \cdot 96 \cdot 1000} = 84,67 \text{ kN} \quad (85)$$

$$V_{cMAX} = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{26,89} \cdot 21.817,09}{96} = 271,76 \text{ kN} \quad (86)$$

$$V_{frp} = 2 \cdot 15,82 \cdot 4 \cdot 1,80 \cdot 64,17/1000 = 14,62 \text{ kN} \quad (87)$$

Dessa forma, a resistência ao cisalhamento da seção é dada por:

$$V_n = 0,80 \cdot (84,67 + 0,85 \cdot 14,62) \leq 271,76 \therefore V_n = 77,68 \text{ kN} \quad (88)$$

#### 8.1.3.4. Verificação entre a resistência ao cisalhamento e o esforço solicitante

A verificação entre a resistência ao cisalhamento da seção transversal e o esforço solicitante foi realizada por meio de três etapas construtivas, sendo para o Estado Limite Último nas condições Normais ( $V_{sd,ELU-N}$ ) e nas condições Construtivas ( $V_{sd,ELU-C}$ ), bem como no Estado Limite de Serviço ( $V_{sd,ELS}$ ). A equação de base para esses cálculos é apresentada na equação (80).

$$V_{sd} = \frac{q_{sd} \cdot L_f}{2} \quad (89)$$

Para calcular  $V_{sd,ELU-N}$  foi considerado que todo o carregamento é suportado pela laje mista, sendo utilizada a carga do peso próprio do concreto, forro e revestimento, bem como a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (81).

$$V_{sd,ELU-N} = \frac{\{(1,3 \cdot 1,42) + [1,5 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,5 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8}{2} = 3,66 \text{ kN} \quad (90)$$

Para calcular  $V_{sd,ELU-C}$  foi levada em consideração as cargas de peso próprio do concreto e sobrecarga de construção, conforme a equação (82).

$$V_{sd,ELU-C} = \frac{[(1,2 \cdot 1,42) + (1,3 \cdot 0,54)] \cdot 1,8}{2} = 2,17 \text{ kN} \quad (91)$$

Para calcular  $V_{sd,ELS}$  foi considerado o carregamento após a carga construtiva, ou seja, sem o peso próprio do concreto. Dessa forma, somaram-se o peso próprio do forro, revestimento e a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (83).

$$V_{sd,ELS} = \frac{\{[1,0 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,0 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8}{2} = 1,33 \text{ kN} \quad (92)$$

Com base nos resultados encontrados nas equações (90), (91) e (92). Os valores podem ser comparados com o valor resistente calculado por meio da equação (88), sendo possível verificar que o esforço resistente é maior do que o esforço solicitante.

#### 8.1.3.5. Cálculo do momento de inercia da seção homogeneizada

Primeiramente calcula-se a razão modular:

$$\alpha_E = \frac{33.090}{1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{26,89}} = \frac{33.090}{34.847} = 0,95 \quad (93)$$

Por meio da equação (29) e do resultado obtido na equação (61), calcula-se o momento de inércia efetivo da seção homogeneizada utilizando o método dos eixos paralelos:

$$I_{ef} = \left[ \frac{53,6 \cdot 4,625^3}{12} + 53,6 \cdot 4,625 \cdot \left( \frac{4,625}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{305,52 + 27,08(10,9 - 4,625)^2}{0,95} \right] \quad (94)$$

$$I_{ef} = 3.212,08 \text{ cm}^4 \quad (95)$$

#### 8.1.3.6. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

Utilizando a equação (33) calcula-se a deflexão estimada para a laje mista com carga distribuída, considerando na fase inicial apenas o momento de inércia da fôrma e na fase final o momento de inércia homogeneizado. A deflexão total da laje é dada pelo somatório da flecha na fase inicial e na fase final.

A deflexão na fase inicial foi calculada por meio da equação (96) e para a fase final, por meio da equação (97). O resultado da deflexão total pode ser visto na equação (98).

$$\delta_{ELS-C} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(1,42 + 0,54) \cdot 1,8^4}{33.090 \cdot 1.010,95 \cdot 10^{-1}} = 0,27 \text{ mm} \quad (96)$$

$$\delta_{ELS} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(0,54 + 0,134 + 0,804) \cdot 1,8^4}{33.090 \cdot 3.212,08 \cdot 10^{-1}} = 0,02 \text{ mm} \quad (97)$$

$$\delta_{total} = 0,27 + 0,02 = 0,29 \text{ mm} \quad (98)$$

## 8.2. CÁLCULO ANALÍTICO CARACTERÍSTICO D6F

### 8.2.1. Dados iniciais

Para o cálculo analítico ponderado foram utilizadas as propriedades do PRFV coletadas nos ensaios de caracterização, sendo estas a resistência última à tração na direção principal à 0° e na direção perpendicular à 90°, bem como o módulo de elasticidade deste material. Como parte dos dados iniciais de cálculo também foi incorporado o valor da resistência à compressão do concreto do espécime em estudo, sendo todos os valores utilizados informados na Tabela 16.

Tabela 17 - Dados de entrada para os cálculos

Descrição	Símbolo		Valor	Und
Deformação última de ruptura	$\varepsilon_{fu}^*$	=	0,023	mm/mm
Resistência última à tração	$F_{fu}^*$	=	760,04	N/mm <sup>2</sup>
Resistência última à tração na transversal	$F_{fu^*,t}$	=	93,79	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	$E_f$	=	33.090	MPa
Espessura nominal da fôrma de PRFV	$t_f$	=	4,00	mm
Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra	$x$	=	46,25	mm
Resistência à compressão do concreto	$f_{ck}$	=	26,89	MPa
Seção transversal efetiva	$A_{ef}$	=	2.416	mm <sup>2</sup>
Comprimento Vão	$L_f$	=	1,80	m

### 8.2.2. Ponderação da resistência do PRFV

#### 8.2.2.1. Coeficiente de ponderação devido à exposição ambiental

Foi calculado a ponderação devido a exposição ambiental por meio da (40) e (41), levando em consideração os dados iniciais expostos na Tabela 16.

$$f_{fu} = 1,00 \cdot 760,04 = 760,04 \text{ N/mm}^2 \quad (99)$$

$$\varepsilon_{fu} = 1,00 \cdot 0,023 = 0,023 \text{ mm/mm} \quad (100)$$

#### 8.2.2.2. Resistência nominal à flexão

À partir do valor encontrado para  $\varepsilon_{fu}$  foi calculada a ponderação considerada na resistência nominal à flexão, por meio da deformação de destacamento ( $\varepsilon_{fd}$ ) calculada na (42), e deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) calculada na (43).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{26,89}{3 \cdot 33.090 \cdot 4}} \leq 0,9 \cdot 0,023 \quad \therefore \varepsilon_{fd} = 0,0034 \text{ mm/mm} \quad (101)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{109 - 46,25}{46,25} \right) \leq 0,0058 \quad \therefore \varepsilon_{fe} = 0,0034 \text{ mm/mm} \quad (102)$$

Dessa forma, a tensão máxima de tração ponderada  $f_{fe,d}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe,d} = E_f \varepsilon_{fe} = 33.090 \cdot 0,0034 = 111,64 \text{ MPa} \quad (103)$$

### 8.2.3. Verificação da laje mista na fase final

#### 8.2.3.1. Determinação do momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente leva em conta os esforços internos na seção transversal. Como o somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, tomou-se a força de tração na fôrma  $N_{frp}$  como parâmetro para o cálculo do momento resistente, conforme (51) a (53).

$$N_{frp,k} = A_{ef} \cdot f_{fe,d} = 2.708 \cdot 111,64 = 302,33 \text{ kN} \quad (104)$$

$$y_l = 109 - 0,8 \cdot 46,25 \cdot 0,5 = 90,50 \text{ mm} \quad (105)$$

$$M_r = N_{frp,k} \cdot y_l = 302,33 \cdot 90,50 = 27,36 \text{ kN.m} \quad (106)$$

#### 8.2.3.2. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

A deflexão total da laje é dada pelo somatório da flecha na fase inicial e na fase final, com as cargas não ponderadas. Por esse motivo, considera-se o mesmo valor encontrado no item 8.1.3.6.

## 8.3. CÁLCULO ANALÍTICO PONDERADO D8F

### 8.3.1. Dados iniciais

Para o cálculo analítico ponderado foram utilizadas as propriedades do PRFV coletadas nos ensaios de caracterização, sendo estas a resistência última à tração na direção principal à 0° e na direção perpendicular à 90°, bem como o módulo de elasticidade deste material. Como parte dos dados iniciais de cálculo também foi incorporado o valor da resistência à compressão do concreto do espécime em estudo, sendo todos os valores utilizados informados na Tabela 16.



Tabela 18 - Dados de entrada para os cálculos

Descrição	Símbolo		Valor	Und
Deformação última de ruptura	$\epsilon_{fu}^*$	=	0,0228	mm/mm
Resistência última à tração	$F_{fu}^*$	=	778,4	N/mm <sup>2</sup>
Resistência última à tração na transversal	$F_{fu^*,t}$	=	105,55	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade do PRFV	$E_f$	=	34.180	MPa
Espessura nominal da fôrma de PRFV	$t_f$	=	5,00	mm
Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra	$x$	=	62,50	mm
Resistência à compressão do concreto	$f_{ck}$	=	20,05	MPa
Seção transversal efetiva	$A_{ef}$	=	3.385	mm <sup>2</sup>
Comprimento Vão	$L_f$	=	1,80	m

### 8.3.2. Ponderação da resistência do PRFV

#### 8.3.2.1. Coefficiente de ponderação devido à exposição ambiental

Foi calculado a ponderação devido a exposição ambiental por meio da (40) e (41), levando em consideração os dados iniciais expostos na Tabela 16.

$$f_{fu} = 0,75 \cdot 778,40 = 583,80 \text{ N/mm}^2 \quad (107)$$

$$\epsilon_{fu} = 0,75 \cdot 0,0228 = 0,0171 \text{ mm/mm} \quad (108)$$

#### 8.3.2.2. Resistência nominal à flexão

À partir do valor encontrado para  $\epsilon_{fu}$  foi calculada a ponderação considerada na resistência nominal à flexão, por meio da deformação de destacamento ( $\epsilon_{fd}$ ) calculada na (42), e deformação efetiva ( $\epsilon_{fe}$ ) calculada na (43).

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{20,05}{3 \cdot 34.180 \cdot 5}} \leq 0,9 \cdot 0,0171 \quad \therefore \epsilon_{fd} = 0,0026 \text{ mm/mm} \quad (109)$$

$$\epsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{109 - 62,50}{62,50} \right) \leq 0,0026 \quad \therefore \epsilon_{fe} = 0,0022 \text{ mm/mm} \quad (110)$$

Dessa forma, a tensão máxima de tração ponderada  $f_{fe,d}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe,d} = E_f \epsilon_{fe} = 34.180 \cdot 0,0022 = 76,29 \text{ MPa} \quad (111)$$

### 8.3.2.3. Resistência nominal ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento foi ponderada de acordo com a (45) a (50).

$$L_e = \frac{23,300}{(4 \cdot 34.180)^{0,58}} = 21,50 \quad (112)$$

$$k_1 = \left(\frac{20,05}{27}\right)^{2/3} = 0,82 \quad (113)$$

$$k_2 = \frac{109 - 62,50}{109} = 0,81 \quad (114)$$

$$\kappa_v = \frac{0,82 \cdot 0,81 \cdot 21,50}{11,900 \cdot 0,0171} \leq 0,75 \quad \therefore \kappa_v = 0,02 \quad (115)$$

$$\varepsilon_{fe,v} = 0,02 \cdot 0,0171 \leq 0,004 \quad \therefore \varepsilon_{fe,v} = 0,0003 \text{ mm/mm} \quad (116)$$

Dessa forma, a tensão resistente de cisalhamento ponderada  $f_{fe,v}$  adotada será:

$$f_{fe,v} = E_f \varepsilon_{fe,v} = 34.180 \cdot 0,0003 = 11,86 \text{ MPa} \quad (117)$$

### 8.3.3. Verificação da laje mista na fase final

#### 8.3.3.1. Determinação do momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente leva em conta os esforços internos na seção transversal. Como o somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, tomou-se a força de tração na fôrma  $N_{frrp}$  como parâmetro para o cálculo do momento resistente, conforme (51) a (53).

$$N_{frrp} = A_{ef} \cdot f_{fe,d} = 3.385 \cdot 76,29 = 258,24 \text{ kN} \quad (118)$$

$$y_i = 109 - 0,8 \cdot 62,50 \cdot 0,5 = 84,00 \text{ mm} \quad (119)$$

$$M_r = \psi_f \cdot N_{frrp} \cdot y_i = 0,85 \cdot 258,24 \cdot 84,00 \cdot 10^{-3} = 18,44 \text{ kN.m} \quad (120)$$

$$M_{rd} = \phi \cdot M_r = 0,8 \cdot 18,44 = 14,75 \text{ kN.m} \quad (121)$$

#### 8.3.3.2. Verificação entre o momento resistente e o momento solicitante

A verificação entre o momento resistente e o momento solicitante foi realizada por meio de três etapas construtivas, sendo para o Estado Limite Último nas condições Normais ( $M_{sd,ELU-N}$ ) e nas condições Construtivas ( $M_{sd,ELU-C}$ ), bem como no Estado Limite de Serviço ( $M_{sd,ELS}$ ). A equação de base para esses cálculos é apresentada na equação (80).

$$M_{sd} = \frac{q_{sd} \cdot L_f^2}{8} \quad (122)$$

Para calcular  $M_{sd,ELU-N}$  foi considerado que todo o carregamento é suportado pela laje mista, sendo utilizada a carga do peso próprio do concreto, forro e revestimento, bem como a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (81).

$$M_{sd,ELU-N} = \frac{\{(1,3 \cdot 1,42) + [1,5 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,5 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8^2}{8} = 1,64 \text{ kN.m} \quad (123)$$

Para calcular  $M_{sd,ELU-C}$  foi levada em consideração as cargas de peso próprio do concreto e sobrecarga de construção, conforme a equação (82).

$$M_{sd,ELU-C} = \frac{[(1,2 \cdot 1,42) + (1,3 \cdot 0,54)] \cdot 1,8^2}{8} = 0,97 \text{ kN.m} \quad (124)$$

Para calcular o momento ponderado no estado limite de serviço na fase construtiva ( $M_{sd,ELS-C}$ ) foi considerado o carregamento antes da carga construtiva, ou seja, apenas o peso próprio do concreto e a sobrecarga construtiva, conforme a equação (83).

$$M_{sd,ELS-C} = \frac{[(1,0 \cdot 1,42) + (1,0 \cdot 0,54)] \cdot 1,8^2}{8} = 0,79 \text{ kN.m} \quad (125)$$

Para calcular o momento ponderado no estado limite de serviço na fase final ( $M_{sd,ELS-F}$ ) foi considerado o carregamento após a carga construtiva, ou seja, sem o peso próprio do concreto. Dessa forma, somaram-se o peso próprio do forro, revestimento e a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (83).

$$M_{sd,ELS} = \frac{\{[1,0 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,0 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8^2}{8} = 0,60 \text{ kN.m} \quad (126)$$

Com base nos resultados encontrados nas equações (81), (82) e (83). Os valores podem ser comparados com o valor resistente calculado por meio da equação (78)(88), sendo possível verificar que o esforço resistente é maior do que o esforço solicitante.

#### 8.3.3.3. Determinação da resistência ao cisalhamento

A resistência nominal ao cisalhamento da laje com fôrma trapezoidal de PRFV foi determinada por meio da (55) a (60)

$$V_c = \frac{63 \cdot \sqrt[3]{20,05^2} \cdot 21.817,09}{1,4 \cdot 96 \cdot 1000} = 69,62 \text{ kN} \quad (127)$$

$$V_{cMAX} = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{20,05} \cdot 21.817,09}{96} = 234,66 \text{ kN} \quad (128)$$

$$V_{frp} = 2 \cdot 11,92 \cdot 5 \cdot 1,80 \cdot 64,17/1000 = 13,70 \text{ kN} \quad (129)$$

Dessa forma, a resistência ao cisalhamento da seção é dada por:

$$V_n = 0,80 \cdot (69,62 + 0,85 \cdot 13,77) \leq 234,66 \therefore V_n = 65,01 \text{ kN} \quad (130)$$

#### 8.3.3.4. Verificação entre a resistência ao cisalhamento e o esforço solicitante

A verificação entre a resistência ao cisalhamento da seção transversal e o esforço solicitante foi realizada por meio de três etapas construtivas, sendo para o Estado Limite Último nas condições Normais ( $V_{sd,ELU-N}$ ), nas condições Construtivas ( $V_{sd,ELU-C}$ ), e no Estado Limite de Serviço ( $V_{sd,ELS}$ ). A equação de base para esses cálculos é apresentada na equação (80).

$$V_{sd} = \frac{q_{sd} \cdot L_f}{2} \quad (131)$$

Para calcular  $V_{sd,ELU-N}$  foi considerado que todo o carregamento é suportado pela laje mista, sendo utilizada a carga do peso próprio do concreto, forro e revestimento, bem como a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (81).

$$V_{sd,ELU-N} = \frac{\{(1,3 \cdot 1,42) + [1,5 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,5 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8}{2} = 3,66 \text{ kN} \quad (132)$$

Para calcular  $V_{sd,ELU-C}$  foi levada em consideração as cargas de peso próprio do concreto e sobrecarga de construção, conforme a equação (82).

$$V_{sd,ELU-C} = \frac{[(1,2 \cdot 1,42) + (1,3 \cdot 0,54)] \cdot 1,8}{2} = 2,17 \text{ kN} \quad (133)$$

Para calcular  $V_{sd,ELS}$  foi considerado o carregamento após a carga construtiva, ou seja, sem o peso próprio do concreto. Dessa forma, somaram-se o peso próprio do forro, revestimento e a sobrecarga de uso residencial, conforme a equação (83).

$$V_{sd,ELS} = \frac{\{[1,0 \cdot (0,54 + 0,31)] + (1,0 \cdot 0,80)\} \cdot 1,8}{2} = 1,33 \text{ kN} \quad (134)$$

Com base nos resultados encontrados nas equações (90), (91) e (92). Os valores podem ser comparados com o valor resistente calculado por meio da equação (88), sendo possível verificar que o esforço resistente é maior do que o esforço solicitante.

#### 8.3.3.5. Cálculo do momento de inercia da seção homogeneizada

Primeiramente calcula-se a razão modular:

$$\alpha_E = \frac{34.180}{1,2 \cdot 5600 \cdot \sqrt{20,05}} = \frac{34.180}{30.090} = 1,14 \quad (135)$$

Por meio da equação (29) e do resultado obtido na equação (61), calcula-se o momento de inércia efetivo da seção homogeneizada utilizando o método dos eixos paralelos:

$$I_{ef} = \left[ \frac{53,6 \cdot 6,25^3}{12} + 53,6 \cdot 6,25 \cdot \left( \frac{6,25}{2} \right)^2 \right] + \left[ \frac{380,61 + 33,85(10,9 - 6,25)^2}{1,14} \right] \quad (136)$$

$$I_{ef} = 5.341,31 \text{ cm}^4 \quad (137)$$

### 8.3.3.6. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

Utilizando a equação (33) calcula-se a deflexão estimada para a laje mista com carga distribuída, considerando na fase inicial apenas o momento de inércia da fôrma e na fase final o momento de inércia homogeneizado. A deflexão total da laje é dada pelo somatório da flecha na fase inicial e na fase final.

A deflexão na fase inicial foi calculada por meio da equação (96) e para a fase final, por meio da equação (97). O resultado da deflexão total pode ser visto na equação (98).

$$\delta_{ELS-c} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(1,42 + 0,54) \cdot 1,8^4}{1.300,91 \cdot 10^{-1}} = 0,206 \text{ mm} \quad (138)$$

$$\delta_{ELS} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(0,54 + 0,134 + 0,804) \cdot 1,8^4}{34.180 \cdot 18.475,48 \cdot 10^{-1}} = 0,011 \text{ mm} \quad (139)$$

$$\delta_{total} = 0,206 + 0,011 = 0,217 \text{ mm} \quad (140)$$

## 8.4. CÁLCULO ANALÍTICO CARACTERÍSTICO D8F

### 8.4.1. Dados iniciais

Para o cálculo analítico ponderado foram utilizadas as propriedades do PRFV coletadas nos ensaios de caracterização, sendo estas a resistência última à tração na direção principal à 0° e na direção perpendicular à 90°, bem como o módulo de elasticidade deste material. Como parte dos dados iniciais de cálculo também foi incorporado o valor da resistência à compressão do concreto do espécime em estudo, sendo todos os valores utilizados informados na Tabela 16.

Tabela 19 - Dados de entrada para os cálculos

Descrição	Símbolo		Valor	Und
Deformação última de ruptura	$\epsilon_{fu}^*$	=	0,0228	mm/mm
Resistência última à tração	$F_{fu}^*$	=	778,4	N/mm <sup>2</sup>
Resistência última à tração na transversal	$F_{fu*,t}$	=	105,55	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	$E_f$	=	34.180	MPa
Espessura nominal da fôrma de PRFV	$t_f$	=	5,00	mm
Distância da fibra mais comprimida para a linha neutra	$x$	=	62,50	mm
Resistência à compressão do concreto	$f_{ck}$	=	20,05	MPa
Seção transversal efetiva	$A_{ef}$	=	3.385	mm <sup>2</sup>

### 8.4.2. Ponderação da resistência do PRFV

#### 8.4.2.1. Coefficiente de ponderação devido à exposição ambiental

Foi calculado a ponderação devido a exposição ambiental por meio da (40) e (41), levando em consideração os dados iniciais expostos na Tabela 16.

$$f_{fu} = 1,00 \cdot 778,40 = 778,40 \text{ N/mm}^2 \quad (141)$$

$$\varepsilon_{fu} = 1,00 \cdot 0,0228 = 0,0228 \text{ mm/mm} \quad (142)$$

#### 8.4.2.2. Resistência nominal à flexão

À partir do valor encontrado para  $\varepsilon_{fu}$  foi calculada a ponderação considerada na resistência nominal à flexão, por meio da deformação de destacamento ( $\varepsilon_{fd}$ ) calculada na (42), e deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) calculada na (43).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{20,05}{3 \cdot 34.180 \cdot 5}} \leq 0,9 \cdot 0,0228 \quad \therefore \varepsilon_{fd} = 0,0026 \text{ mm/mm} \quad (143)$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{109 - 62,50}{62,50} \right) \leq 0,0026 \quad \therefore \varepsilon_{fe} = 0,0022 \text{ mm/mm} \quad (144)$$

Dessa forma, a tensão máxima de tração  $f_{fe}$  adotada antes da falha da estrutura será:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 34.180 \cdot 0,0022 = 76,29 \text{ MPa} \quad (145)$$

### 8.4.3. Verificação da laje mista na fase final

#### 8.4.3.1. Determinação do momento fletor resistente

A determinação do momento fletor resistente leva em conta os esforços internos na seção transversal. Como o somatório desses esforços internos na seção transversal deve ser nulo, tomou-se a força de tração na fôrma  $N_{f_{rp}}$  como parâmetro para o cálculo do momento resistente, conforme (51) a (53).

$$N_{f_{rp}} = A_{ef} \cdot f_{fe} = 3.385 \cdot 76,29 = 258,24 \text{ kN} \quad (146)$$

$$y_l = 109 - 0,8 \cdot 62,50 \cdot 0,5 = 84,00 \text{ mm} \quad (147)$$

$$M_{r,i} = N_{f_{rp}} \cdot y_l = 258,24 \cdot 84,00 = 21,67 \text{ kN.m} \quad (148)$$

#### 8.4.3.2. Cálculo deflexão e determinação do vão máximo

A deflexão total da laje é dada pelo somatório da flecha na fase inicial e na fase final, com as cargas não ponderadas. Por esse motivo, considera-se o mesmo valor encontrado no item 8.3.3.6.