

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

Lucas Flor Negreiros

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS EM
CONCRETO TÊXTIL SUBMETIDOS À FLEXÃO**

Porto Alegre
Fevereiro 2024

LUCAS FLOR NEGREIROS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS EM
CONCRETO TÊXTIL SUBMETIDOS À FLEXÃO**

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

Orientadora: Paula Manica Lazzari

Porto Alegre
Fevereiro 2024

LUCAS FLOR NEGREIROS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS EM
CONCRETO TÊXTIL SUBMETIDOS À FLEXÃO**

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

Porto Alegre, 16 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Paula Manica Lazzari (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador/a

Prof. Lucas Alexandre Reginato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Civil Tobias Pigatto Ottoni (UFRGS)
Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria

Dedico este trabalho a minha noiva Luisa, por estar ao meu lado durante cada etapa do curso, apoiando e me ajudando a superar todas as dificuldades enfrentadas.

AGRADECIMENTOS

Neste momento, gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu alcançasse este momento especial na minha vida.

Aos membros do LEME, Sr. Zé e Sr. Edgar, agradeço profundamente por toda compreensão e disponibilidade de tempo dedicados ao auxílio da parte prática desta pesquisa.

Expresso meu profundo reconhecimento a todos os professores que me guiaram ao longo da minha jornada acadêmica. Sua dedicação em sala de aula foi fundamental para minha formação e preparação para os desafios que enfrentei e enfrentarei.

Agradeço a Joici Rizzo pelo material doado e pelo direcionamento na parte experimental da pesquisa.

Aos professores Lucas Reginato e Tobias Ottoni, minha gratidão pela disponibilidade e apoio nos ensaios realizados. Sempre foram compreensivos e prestativos, prontos para esclarecer quaisquer dúvidas.

Estendo meus agradecimentos às empresas que forneceram os materiais utilizados nesta pesquisa. Seu apoio é crucial para o avanço da pesquisa e contribui para uma indústria mais sustentável.

A todos os amigos que estiveram ao meu lado nesta jornada, dentro e fora da universidade, meu mais sincero agradecimento. Todo o apoio foi fundamental em todos os momentos da graduação. Especialmente, gostaria de mencionar Bruno Rios, Matheus Laurindo, Mauricio Martins, João Casali, Douglas Raupp, Adriano Schimit, Rafael Spinelli, Dailson e Henrique Pereira.

Aos amigos que não apenas compartilharam a graduação, mas também fizeram parte de toda minha vida até o momento presente, meus sinceros agradecimentos a Renan Braga, Vladimir Moraes e Oscar Ferri, que infelizmente não está mais entre nós, mas que nunca deixou de me apoiar.

Agradeço imensamente à minha família por acreditar em mim e por sempre me apoiar. Especialmente, agradeço a minha irmã Luana Flor, meu cunhado Vagner, minha tia Patrícia, meu tio Jeferson Pereira e minha tia Charlene, que nos momentos mais difíceis me acolheram e ajudaram, seja financeiramente ou com palavras de incentivo. Isso nunca será esquecido.

Agradeço meu tio Vinicius, que desde o início compartilhou todos os momentos comigo. Nas etapas mais difíceis, foi quem esteve do meu lado todos os dias sendo sempre compreensível e me ajudando com palavras a resistir a todos os problemas enfrentados. Meu muito obrigado.

Agradeço aos meus avós, que são de extrema importância para mim e que sempre me apoiaram e incentivaram em todos os momentos.

Aos meus pais, agradeço por me incentivarem desde o início. Enfrentar a vida longe de vocês não foi fácil, mas o apoio e os esforços que fizeram na vida pessoal de vocês para que eu pudesse seguir em frente, me deram forças para enfrentar todas as batalhas da vida.

Um agradecimento especial à professora Paula Manica Lazzari, que além de ser minha orientadora, foi um apoio fundamental nesta fase da minha graduação. Sua dedicação e incentivo foram extremamente fundamentais para a conclusão desta pesquisa. Se todos os professores fossem metade do que foi, o mundo acadêmico seria visto com outros olhos pelos alunos.

Por fim, quero expressar minha profunda gratidão à minha noiva, Luisa, por enfrentar todas as dificuldades comigo há 9 anos. Foi nos momentos difíceis que percebi o quanto és importante em minha vida. Admiro profundamente a pessoa que és e a excelente enfermeira que te tornarás. Obrigado por compartilhar esta jornada comigo. Também agradeço aos meus sogros por todo o apoio e conselhos que nos foram dados. Muito obrigado por tudo.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O concreto é um material fundamental na construção civil, com um consumo anual global estimado em 11 bilhões de toneladas métricas, destacando-se por sua versatilidade e durabilidade. No entanto, apesar do seu papel crucial, o concreto armado teve um impacto significativo na construção civil durante o século XX, enfrentando grandes desafios. Embora, inicialmente, tenha sido considerado altamente resistente e durável, problemas como a corrosão do aço utilizado em sua estrutura tornaram-se evidentes com o tempo. Pensando em materiais inovadores e sustentáveis, para solucionar os problemas gerados pela corrosão, o Concreto têxtil ou TRC (*Textile Reinforced Concrete*) é um compósito formado pela combinação de uma matriz cimentícia fina com uma ou mais camadas de reticulados de fibras não metálicas de alta resistência mecânica. A principal vantagem desses reforços em comparação com os reforços de aço convencionais é sua natureza não corrosiva, o que resulta em uma redução significativa nos revestimentos de concreto. Com isso, realizou-se um estudo experimental para avaliar o comportamento mecânico da utilização do têxtil de fibra de vidro álcali resistente "AR-360" como reforço estrutural submetido a ensaios de flexão, visando incentivar pesquisas e aplicabilidade no mercado da construção civil. Ainda, foi empregado um método de dosagem para uma matriz cimentícia altamente resistente utilizando granulometria fina, já que, para a utilização do reforço têxtil, deve-se obter um concreto fluido e coeso, para que se ajuste dentro da forma e se molde juntamente com a manta têxtil. Para obter resultados mais precisos, foi realizada uma sequência completa de montagem dos elementos em concreto têxtil. Isso incluiu desde a montagem e desmontagem das formas até a concretagem e inserção dos corpos de prova na câmara úmida, onde permaneceram por mais de 28 dias para os ensaios. Nas análises dos resultados, foram obtidas curvas de força versus deslocamento, onde foi possível verificar a formação dos estágios previstos na literatura, onde a divisão ocorre desde o início das primeiras fissuras até a estabilidade, chegando à ruptura tanto pela flexão, onde o têxtil é rompido, ou por cisalhamento, onde o concreto ultrapassa a sua resistência máxima. Na conclusão deste estudo, foram destacados pontos importantes. Foi considerado significativo o resultado de todas as análises realizadas, evidenciando um aumento significativo na força suportada pelos elementos com reforço duplo de manta de fibra de vidro em comparação com aqueles com apenas uma camada, conforme previsto e confirmado pelos resultados obtidos.

Palavras-chave: *Concreto Têxtil, Têxtil de Fibra de Vidro, Comportamento Mecânico.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Etapas do Delineamento da pesquisa | 16 |
| Figura 2.1 – Processo de obtenção das fibras de carbono..... | 21 |
| Figura 2.2 – Entalhes formados na superfície da fibra de vidro..... | 22 |
| Figura 2.3 – Curva do concreto de granulometria fina..... | 24 |
| Figura 2.4 – Composição das misturas analisadas..... | 25 |
| Figura 2.5 – Curvas de empacotamento ideal e da mistura IDE87..... | 25 |
| Figura 3.1 – Planejamento da pesquisa..... | 26 |
| Figura 3.2 – Distribuição granulométrica do Cimento..... | 28 |
| Figura 3.3 – Distribuição granulométrica da Sílica ativa..... | 28 |
| Figura 3.4 – Distribuição granulométrica da Cinza volante..... | 29 |
| Figura 3.5 – Distribuição granulométrica do Carbonato de cálcio..... | 29 |
| Figura 3.6 – Distribuição granulométrica da Areia..... | 30 |
| Figura 3.7 – Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento da mistura..... | 31 |
| Figura 3.8 – Empacotamento Teórico x Empacotamento da mistura..... | 31 |
| Figura 3.9 – Argamassadeira protegida com lona para mistura dos materiais secos..... | 33 |
| Figura 3.10 – Adição de 90% de água (a) e adição de 10% de água, superplastificante e modificador de viscosidade (b)..... | 33 |
| Figura 3.11 – Concreto em seu aspecto fluído (a) e adição do desincorporador de ar (b)..... | 34 |
| Figura 3.12 – Formas utilizadas (a) e as formas com desmoldante (b)..... | 35 |
| Figura 3.13 – Corte da forma com o posicionamento do têxtil | 35 |
| Figura 3.14 – Concreto juntamente com a manta têxtil (a) e a forma totalmente coberta de concreto (b)..... | 36 |
| Figura 3.15 – Formas organizadas encima da bancada..... | 37 |
| Figura 3.16 – Elementos em câmara úmida coberto por lonas (a) e descoberta para melhor visualização (b)..... | 37 |
| Figura 3.17 – Peças desformadas em câmara úmida..... | 38 |
| Figura 3.18 – Corpos de provas cilíndricos..... | 39 |
| Figura 3.19 – Têxtil de vidro em rolo (a) e Têxtil de vidro cortado para utilização (b).. | 39 |
| Figura 3.20 – Comprimento do elemento revestido em têxtil..... | 41 |
| Figura 3.21 – Largura do elemento revestido em têxtil (a) e altura da manta (b)..... | 41 |
| Figura 3.22 – Posicionamento do elemento na prensa..... | 42 |
| Figura 3.23 – Marcações dos apoios e forças aplicadas..... | 43 |
| Figura 3.24 – Posicionamento do elemento na prensa..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.25 – Posicionamento dos LVDT's na região central da seção..... | 44 |
| Figura 4.1 – Utilização do software Catman Easy para obtenção dos gráficos de ensaio..... | 46 |
| Figura 4.2 – Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação..... | 49 |
| Figura 4.3 – Ruptura por flexão (a) e ruptura por cisalhamento (b)..... | 51 |
| Figura 4.4 – Análise de ruptura por Kulas (2013) | 51 |
| Figura 4.5 – Fissurações por flexão e deslocamento para área de carga..... | 52 |
| Figura 4.6 – Amostra A1VC1 (a), amostra A2VC1 (b), amostra A3VC1 (c) e todas as amostras (d). | 53 |
| Figura 4.7 – Amostra A1VC1 (a), amostra A2VC1 (b) e amostra A3VC1 (c)..... | 54 |
| Figura 4.8 – Gráfico da média das amostras de uma camada..... | 55 |
| Figura 4.9 – Amostra A4VC2 (a), amostra A5VC2 (b), amostra A6VC2 (c) e todas as amostras (d)..... | 56 |
| Figura 4.10 – Amostra A4VC2 (a), amostra A5VC2 (b) e amostra A6VC2 (c)..... | 57 |
| Figura 4.11 – Gráfico da média das amostras de duas camadas..... | 58 |
| Figura 4.12 – Gráfico da média das amostras com uma e duas camadas..... | 58 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 3.1 – Nomenclatura das amostras..... | 45 |
| Quadro 4.1. Evolução das distribuições de deformação no concreto | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Valores característicos das fibras..... | 19 |
| Tabela 2.2 – Composição das misturas analisadas | 23 |
| Tabela 2.3 – Parâmetros das misturas analisadas..... | 23 |
| Tabela 3.1 – Composição da matriz utilizada..... | 32 |
| Tabela 3.2 – Especificação do têxtil de vidro AR..... | 40 |
| Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de compressão..... | 47 |
| Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de compressão de pesquisas anteriores..... | 48 |
| Tabela 4.3 – Resultados máximos obtidos por outros autores..... | 54 |
| Tabela 4.4 – Resultados máximos obtidos para cada amostra..... | 57 |
| Tabela 4.5 – Resultados máximos obtidos para cada amostra com uma e duas camadas de reforço..... | 59 |

LISTA DE SIGLAS

TRC - Textile Reinforced Concrete

DIC – Correlação Digital de Imagens

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

DFG - German Research Foundation

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT - Transdutor de Deslocamento Variável Linear

IDE - Índice de Desvio de Empacotamento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

pH - Potencial hidrogeniônico

MPa – Mega Pasca

AR - Àlcali resistente

mm - Milímetros

UHPC - Concreto de Ultra Alto Desempenho

ARI - Alta Resistência Inicial

cm – Centímetros

NBR – Norma Brasileira

mm² - Milímetro Quadrado

CP – Corpo de prova

kN - Kilo Newton

LISTA DE SÍMBOLOS

fc_m - Resistência à compressão.

n - Quantidade de fios do têxtil.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Principal | 15 |
| 1.1.2 Objetivo Secundário | 15 |
| 1.2 LIMITAÇÕES | 15 |
| 1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA | 16 |
| 2 CONCRETO TÊXTIL | 17 |
| 2.1 DEFINIÇÃO | 17 |
| 2.2 TÊXTEIS | 18 |
| 2.3 TIPOS DE FIBRAS | 19 |
| 2.3.1 Aramida | 19 |
| 2.3.2 Basalto | 20 |
| 2.3.3 Carbono | 20 |
| 2.3.4 Fibra de vidro Álcali-resistente | 21 |
| 2.4 CONCRETO FINO | 22 |
| 3 METODOLOGIA | 26 |
| 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA | 26 |
| 3.2 DEFINIÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA | 27 |
| 3.2.1 Caracterização dos materiais da matriz cimentícia | 27 |
| 3.2.1.1 Cimento | 27 |
| 3.2.1.2 Sílica ativa | 28 |
| 3.2.1.3 Cinza Volante | 29 |
| 3.2.1.4 Carbonato de Cálcio | 29 |
| 3.2.1.5 Areia | 30 |
| 3.3 MÉTODO DE DOSAGEM | 30 |
| 3.3.1 Mistura do Concreto | 32 |
| 3.3.2 Moldagem | 34 |
| 3.3.3 Cura do Concreto | 36 |
| 3.3.4 Propriedades da Matriz no Estado Endurecido | 37 |
| 3.4 REFORÇO TÊXTIL | 38 |
| 3.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO | 39 |
| 3.5.1 Confeção das Amostras | 40 |
| 3.5.2 Procedimento de Ensaio | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5.3 Variáveis do Ensaio Experimental | 45 |
| 4 RESULTADOS | 47 |
| 4.1 CONCRETO | 48 |
| 4.2 CONCRETO COM REFORÇO DA FIBRA DE VIDRO | 49 |
| 4.2.1 Análise das Rupturas e Trincas | 51 |
| 4.2.2 Concreto Reforçado com Uma Camada de Têxtil de Vidro | 53 |
| 4.2.3 Concreto Reforçado com Duas Camadas de Têxtil de Vidro | 56 |
| 4.2.4 Análise do concreto reforçado com uma e duas camadas de têxtil de vidro | 59 |
| 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 60 |
| 5.1 CONCLUSÕES | 61 |
| 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 62 |
| REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A relevância do concreto na construção civil nos dias de hoje é inquestionável, evidenciada pelo significativo progresso no desenvolvimento urbano observado nos últimos tempos. Sendo o material mais utilizado no mundo, estima-se um consumo anual na ordem de 11 bilhões de toneladas métricas (Mehta; Monteiro, 2006), tornando-se insubstituível quando se fala em construção.

Durante o século XX, a construção civil passa por uma grande mudança com a chegada do concreto armado. Acreditava-se que devido a sua alta resistência, durabilidade e versatilidade na montagem da estrutura não ocorreriam manutenções e que as estruturas teriam uma vida útil ilimitada. No entanto, com o avanço das tecnologias e maiores conhecimentos sobre o concreto armado, encontram-se diversas desvantagens relacionadas principalmente ao aço que é empregado. Isto ocorre, pois ao longo do tempo o concreto vai perdendo sua resistência devido a fatores externos, resultando em uma maior exposição do aço que fica sujeito a corrosões, levando à esfoliação do concreto, reduzindo a permanência da estrutura como um todo e levando a falhas estruturais em casos extremos (Kulas, 2015).

Uma das principais soluções para os problemas enfrentados nos dias de hoje pela construção civil destaca-se o concreto têxtil (*Textile Reinforced Concrete*, TRC), um compósito resultante da união entre uma matriz cimentícia de granulometria fina e uma ou mais camadas de reticulados de fibras não metálicas de altas propriedades mecânicas (Gries et al., 2006). Segundo Kulas (2015), a principal vantagem desses reforços comparados com os reforços de aço convencionais é o seu comportamento não corrosivo, reduzindo significativamente os cobrimentos de concreto.

O concreto têxtil, apesar de apresentar significativas vantagens, ainda é uma novidade no cenário da construção civil e está sendo intensamente estudado em diversos países. Destaca-se, especialmente, o notável empenho na pesquisa realizado na Alemanha, nas Universidades de

Aachen e Dresden, com o suporte da *German Research Foundation* (DFG). Nesse contexto, observou-se o aprimoramento do seu precursor, o Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas, culminando no desenvolvimento do atual Concreto Têxtil.

Embora o concreto têxtil já esteja bem avançado em relação a estudos em outros países, no Brasil ainda é muito recente. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) é uma das universidades pioneiras nesse estudo, tendo o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) como o grande centro dessas pesquisas, trazendo diversos ensaios com diferentes aplicações e mantas de revestimentos. Destaca-se, recentemente o estudo experimental realizado por Rizzo (2023) com o resultado do comportamento mecânico em relação ao concreto têxtil submetido à tração, com dois materiais principais sendo eles a fibra de carbono e a fibra de vidro. Outras pesquisas que abordaram o reforço de vigas com fibra de vidro também foram de extrema importância para o avanço na compreensão dos comportamentos desses reforços frente a diferentes tipos de esforços. Destacam-se, entre eles, o estudo conduzido por Giese (2019), que investigou a utilização de argamassa reforçada com tecido de fibra de vidro resistente a álcalis para reforçar vigas de concreto armado à flexão, e a análise experimental realizada por Oestreich (2022) sobre vigas de concreto armado reforçado com tecido de fibra de vidro resistente a álcalis, ambos realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo aprofundar a compreensão e promover a disseminação do conhecimento acerca das propriedades e aplicabilidades do concreto têxtil na construção civil brasileira. Realizando-se análises do concreto têxtil submetido à flexão, com ênfase no material de reforço fibra de vidro. Ainda, ao longo deste trabalho, foram analisados dados e resultados de pesquisas recentes, tanto no cenário internacional quanto nacional, visando contextualizar o estágio atual do desenvolvimento do concreto têxtil.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão descritos a seguir e são divididos como principal e secundários.

1.1.1 Objetivo Principal

O principal objetivo desta pesquisa consiste em realizar um estudo experimental sobre o comportamento à flexão de lajes com seção transversal de 70x15 cm com 3 cm de espessura, as quais foram reforçadas com tecido de fibra de vidro, empregando concreto de alta resistência.

1.1.2 Objetivo Secundário

Os objetivos secundários desta pesquisa estão destacados abaixo:

- a) desenvolvimento e estudo de traço da matriz cimentícia;
- b) análise da influência do número de camadas de reforço têxtil.

1.2 LIMITAÇÕES

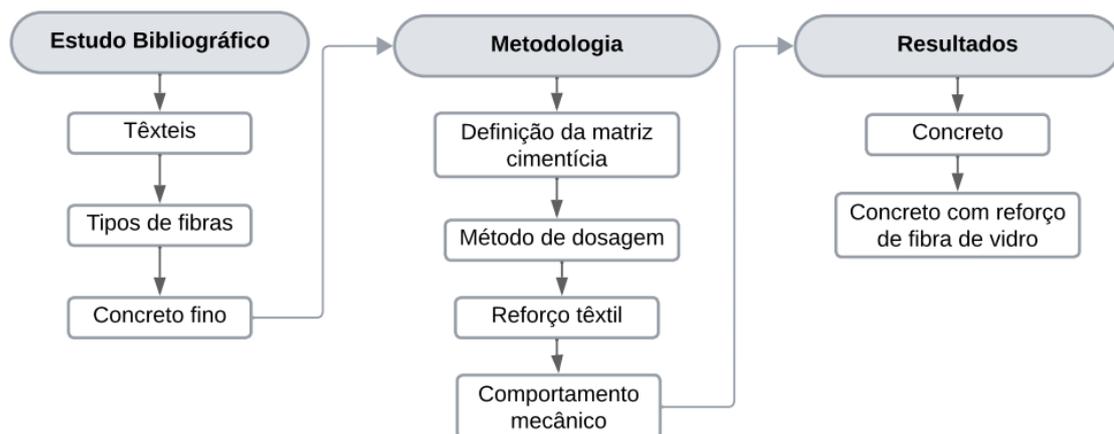
Neste trabalho consta as seguintes limitações:

- a) todos ensaios feitos no laboratório de pesquisa do LEME;
- b) para as camadas de reforço, foi limitada apenas em experimentos com uma e duas camadas de têxtil.

1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O estudo referente à análise experimental dos elementos em concreto têxtil foi realizado em etapas conforme explicitado na Figura 1.1. O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos. O **Capítulo 1**, refere-se a uma introdução mais geral do tema e dos assuntos que serão abordados posteriormente, contendo a contextualização, os objetivos e as limitações da pesquisa. No **Capítulo 2**, está toda a revisão bibliográfica mais atualizada sobre o concreto têxtil onde está abordado os assuntos sobre os tipos de fibras comumente aplicados e o concreto utilizado para esse tipo de reforço, a fim de uma maior compreensão para o desenvolvimento desse trabalho. Posteriormente, no **Capítulo 3**, encontra-se a metodologia usada para o experimento dos elementos em têxtil, contendo o estudo do método de dosagem, a confecção e mistura dos materiais para o concreto disposto em um passo a passo e também sobre os ensaios de compressão para fins de resistência do concreto e ensaios de flexão para análises do reforço. No **Capítulo 4**, está explicitado todos os resultados obtidos dos elementos em têxtil desenvolvido experimentalmente, por gráficos de força *versus* deslocamento. Por fim, no **Capítulo 5** estão as conclusões obtidas através dos resultados e considerações finais.

Figura 1.1 – Etapas do Delineamento da pesquisa.



(Fonte: Autor (2024))

2 CONCRETO TÊXTIL

Neste capítulo, será abordado detalhadamente a definição do TRC (*Textile Reinforced Concrete*) com sua respectiva função principal no aspecto de inovação do têxtil na engenharia civil, com foco especial nas fibras utilizadas e sua interação com o concreto fino. Este capítulo visa proporcionar uma compreensão abrangente das características do material têxtil, destacando suas propriedades mecânicas e estruturais relevantes para a construção civil.

2.1 DEFINIÇÃO

Com o aumento da verticalização de edifícios nas áreas urbanas, tende-se a aumentar significativamente a demanda referente ao concreto armado. Porém, degradando as estruturas, devido à penetração de agentes oxidantes faz com que o avanço de inovações para substituições dos materiais utilizados na grande maioria das construções, ganhe mais credibilidade.

Pesquisas relacionadas a substituições do aço começaram a surgir principalmente na Alemanha na década de 1980 com considerações iniciais sobre o uso de têxteis como reforço para concreto. Somente nos anos 2000 foram concluídos os primeiros projetos de aplicação, conforme destacado por Scheerer, Schladitz e Curbach (2015). O projeto piloto consistiu na construção de uma ponte não padronizada utilizando material inovador, com o objetivo principal de transferir a pesquisa para uma aplicação prática.

O concreto têxtil, também conhecido como TRC (*Textile Reinforced Concrete*) pode ser definido como uma matriz cimentícia com grãos finos de alta resistência e tecidos têxteis que são capazes de resistir às forças de tração que geram fissurações no concreto (Hegger; Will; Rüberg, 2007; Rizzo, 2023). Além disso, Hegger e Voss (2007) destacam que o TRC não requer cobertura de concreto para proteger o reforço contra corrosão e que o material de fibra é colocado apenas onde é necessário na direção das forças que serão aplicadas, reduzindo significativamente as espessuras do concreto.

Para melhor entendimento das definições e descrições do têxtil, Giese (2019) destaca os termos mais utilizados, conforme descrito abaixo:

- a) *Fibre* – Fibra: unidade de matéria prima, podendo ser natural ou sintética. É caracterizada por ter seu comprimento maior ou igual a 100 vezes seu diâmetro ou espessura;
- b) *Filament* – filamento: uma fibra com grande comprimento que pode ser encontrada naturalmente ou extrudada;
- c) *Yarn* – fio: constitui no agrupamento de filamentos que são torcidos, alinhados ou a combinação dos dois formando um fio que poderá ser tecido através de variadas técnicas;
- d) *Rovings* – feixe: trata-se de um tipo de agrupamento de filamentos que pode ser caracterizado como uma tira condensada que foi torcida e dobrada, estando entre um fio e uma tira;
- e) *Strands* – cordão: atribuído para descrever uma fibra, filamento ou ainda formas de agrupamentos de filamentos, como tiras, feixes, fios, mechas, cordas e tranças;
- f) *Tex* – Tex: trata-se de uma unidade utilizada para expressar a densidade linear de um elemento de têxtil (fibra, fio, filamento, feixe), representando a massa em gramas de um quilômetro do elemento;
- g) *Warp* – urdume ou fio de urdidura: é constituído pelos fios do tecido que correm longitudinalmente e paralelos a borda, sendo entrelaçado pelos fios na outra direção. Em geral, os fios de urdidura são posicionados na mesma direção do esforço solicitante;
- h) *Weft* - trama: é constituído por todos os fios que correm perpendicularmente ao urdume e vão de uma borda a outra do tecido.

2.2 TÊXTEIS

O termo têxtil, traduzido livremente do inglês “textile”, faz referência a tecidos ou outro produto fabricado que sejam formados por filamentos, naturais ou sintéticos (Giese, 2019), ou seja, é a transformação de fibras em fios agrupados para a formação de malhas resistentes e maleáveis. Cada filamento possui entre 5 a 30 μm de diâmetro, dependendo do material (Kulas; GMBH, 2015), sendo a unidade de medida de um fio nomeada de tex – grama por 1000 metros – e depende apenas do diâmetro médio e densidade das fibras (Morassutti, 2016).

Esse reforço de têxtil é comumente utilizado principalmente como malha, produzida a partir do processamento de fibras de alto desempenho (Araújo, 2019), fornecendo uma melhor ductilidade e resistência às tensões de tração solicitantes (Alrshoudi, 2015). Esta melhora ocorre

pois os fios são entrelaçados por tricotagem seguindo direções diferentes para ambos os lados, denominados como trama ou urdume.

2.3 TIPOS DE FIBRAS

Hoje em dia, existem diversos de tipos de fibras disponíveis no mercado para aplicações, mas para o reforço em concreto têxtil nem todos são adequados. As variações das propriedades de cada material em têxtil faz com que dependa do tipo de aplicação que deverá ser usado, pelas reações que são geradas, principalmente, nos ambientes alcalinos que faz com que suas resistências diminuam drasticamente, afetando diretamente no desempenho da composição empregada.

Segundo Kulas (2013), com a existência de inúmeras fibras disponíveis, elas podem ser divididas em dois grupos sendo elas fibras naturais ou químicas. A diferença entre elas está na sua formação já que as químicas apesar de serem naturais passam por processos químicos em sua composição, trazendo melhores resultados dependendo do meio de aplicação. Alguns valores comumente utilizados, podem ser analisados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Valores característicos das fibras.

| Tipo de Fibra | Densidade [g/cm³] | $\sigma_{M\acute{a}x}$ [N/mm²] | $\epsilon_{M\acute{a}x}$ [%] | E [N/mm²] |
|----------------------|-------------------------------------|---|--|-----------------------------|
| Aramida | 1,5 | 3400 a 3600 | 20 até 40 | 80.000 a 186.000 |
| Basalto | 2,6 | 990 a 4800 | 15 até 32 | 64.000 a 89.000 |
| Carbono | 1,8 | 2000 a 6000 | 3,5 até 21 | 180.000 a 650.000 |
| Vidro AR | 2,7 | 1300 a 2000 | 20 até 43 | 21.000 a 74.000 |

(Fonte: Adaptado de Kulas (2013))

2.3.1 Aramida

Denominadas quimicamente de poliparafenileno tereftalamida, as fibras de aramida são materiais de alta resistência e alto módulo (Oestreich, 2022). Porém, essas fibras perdem muita resistência quando dispostas a pH's elevados principalmente a concretos finos de alta resistência, onde o pH é superior a 12 chegando a perdas de 60% da sua resistência (Kulas, 2013).

As fibras de aramida apresentam resistências da ordem de 3.000 MPa e módulo de elasticidade variando entre 60 e 120 GPa (Beber, 2003). Algumas das características principais da aramida estão a sua tenacidade e resistência ao fogo, suportando elevadas temperaturas.

Sendo diferentemente das fibras de carbono, vidro e basalto, fibras de aramida tendem a absorver água, o que afeta negativamente na adesão fibra-matriz (Araújo, 2019). Ainda, Kulas (2013) afirma que devido aos aspectos citados, a fibra de aramida não foi aceita no mercado têxtil.

2.3.2 Basalto

Fibras de basalto podem ser categorizadas como de origem mineral não-orgânica ou artificial. A primeira, por ter origem vulcânica, apresenta uma maior variabilidade em suas propriedades, (Araújo, 2019). Além de excelentes propriedades térmicas, sendo capazes de suportar temperaturas contínuas de até 1200 °C, as fibras de basalto possuem boa resistência aos ambientes alcalinos com valores elevados de pH (Peled *et al.*, 2017), sendo nesse aspecto diferente das fibras de aramida, onde perdem resistência com pH's altos.

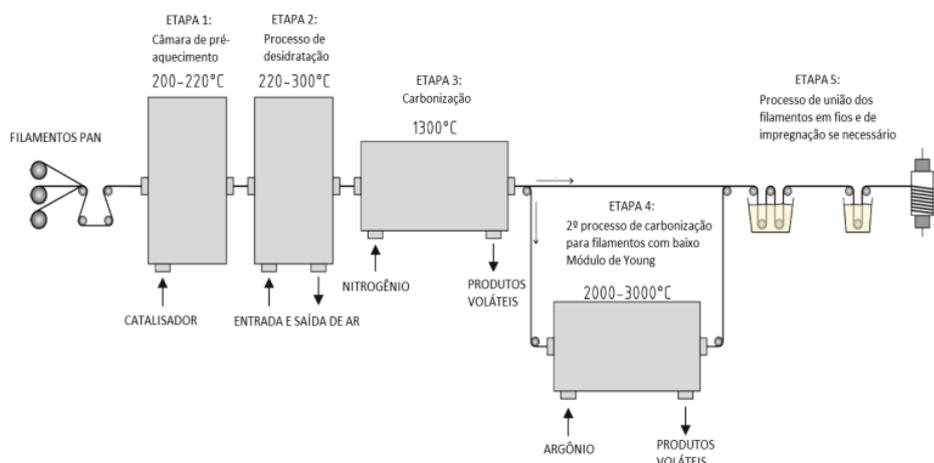
Kulas (2013) cita que houve um grande avanço nos estudos do uso de fibras de basalto desde o início de 1960 na antiga União Soviética. Mas, investigações sobre a durabilidade quando dispostos em ambientes alcalinos concluiu-se que depois de 28 dias a sua resistência tinha diminuído 80% mantendo somente 20% da sua resistência nas fibras. Diante disso, similarmente à fibra de aramida, a fibra de basalto ainda não é bem aceita no mercado têxtil.

2.3.3 Carbono

As fibras de carbono são comumente utilizadas e tratadas como material promissor, pois possuem alta resistência, grande rigidez e são de baixo peso. Ainda, é um material altamente resistente a ambientes alcalinos o que é de suma importância para a construção civil, justamente pelos problemas enfrentados nas estruturas serem causadas pelas reações corrosivas.

O processo de fabricação das fibras de carbono (Figura 2.1) é bem interessante, pois se trata-se de um processo térmico onde as resistências podem ser ajustadas conforme necessidade. Isso acontece, pois o carbono é exposto a temperaturas extremamente baixa e em seguida a temperaturas elevadas em torno de 1300° C. Nesse processo, ocorre a remoção de átomos de hidrogênio por meio da oxidação, deixando a fibra sem exposição a riscos a ambientes corrosivos. Ainda, o carbono é desidratado ocorrendo sua carbonatação fornecendo módulos de elasticidade em torno de 300.000 N/mm² (Kulas, 2013).

Figura 2.1 – Processo de obtenção das fibras de carbono.



(Fonte: Araújo (2019))

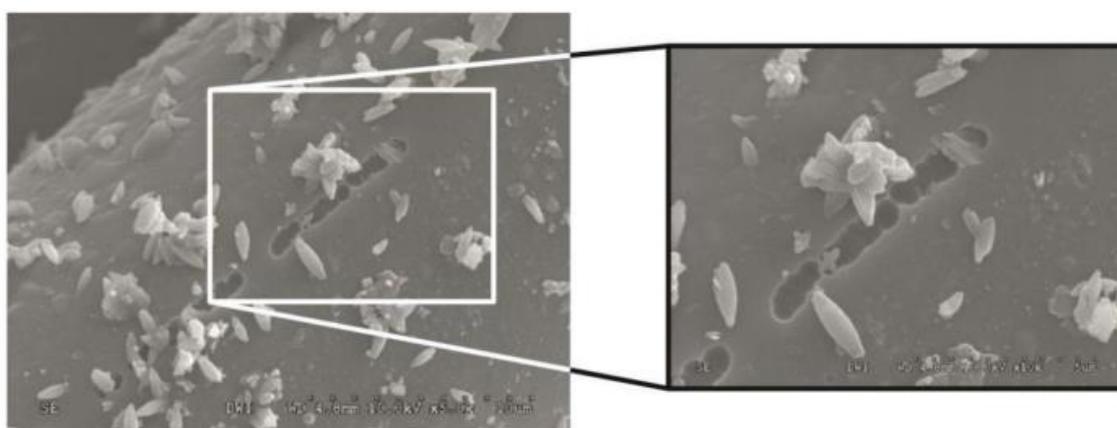
A fibra de carbono é uma solução bem superior quando se trata de durabilidade em relação a ambientes alcalinos, porém seu alto custo e baixa disponibilidade no mercado para demandas altas na construção, faz com que ainda seja pouco utilizado (Morassutti, 2016).

2.3.4 Fibra de vidro Álcali-resistente

A utilização da fibra de vidro não é tão recente, tendo seu início com aplicações para isolamentos térmicos e elétricos em meados de 1930 (Kulas, 2013). Com um baixo custo, altas resistências e com baixa densidade, acabou sendo limitado por muitos anos justamente pela sua decomposição devido a alcalinidade do concreto e que segundo Spauszus (1974, apud Hartig, 2011) ocorre a destruição da configuração tetraédrica típica da fibra de vidro ocasionada pela reação de íons de hidróxidos (OH⁻).

Com a impregnação do óxido de zircônio no vidro fundido cria-se uma proteção adicional aos ataques de álcalis (Büttner, 2013) sendo assim criada a fibra de vidro AR (*Álcali-resistente*). Mas, segundo Büttner (2012), cálculos demonstram que ainda é prevista uma redução de resistência de 40% em 50 anos devido à formação de entalhes na superfície da fibra (Kulas, 2013), conforme mostrado na Figura 2.2. Uma maneira de reduzir ainda mais essas perdas, é a utilização de materiais impermeabilizantes como resina epóxi servindo como barreira de difusão, protegendo ainda mais a interação com ambientes alcalinos.

Figura 2.2. Entalhes formados na superfície da fibra de vidro.



(Fonte: Kulas (2013))

2.4 CONCRETO FINO

Para garantir a penetração do reforço têxtil, o concreto que é designado para este tipo de estrutura deve atender especificações especiais levando em consideração o diâmetro máximo dos grãos. A matriz cimentícia utilizada para essas aplicações é composta por uma argamassa fluída autoadensável e de alta resistência, preenchendo todas as mechas sem a necessidade de vibrações posteriores (Rizzo, 2023).

Por se tratar de grãos de diâmetro máximo de 2 mm, por definição seria uma “argamassa”. Mas, devido ao seu alto desempenho que se assemelha a concretos de alta resistência, foi adotada como nomenclatura para essa matriz cimentícia “Concreto fino” (Voss, 2008). Ainda, esse concreto geralmente é constituído de cinza volante e sílica ativa, onde se é controlada a

propriedade de ligação dos materiais e a fluidez respectivamente para o desenvolvimento da resistência adequada.

Pensando em uma melhor verificação das propriedades deste concreto fino, Brockmann (2006) investigou 3 misturas distintas, sendo nomeadas como “PZ-0899-01”, “FA-1200-01” e “RP-03-02” e seus resultados são demonstrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Composição das misturas analisadas.

| Mistura | Unidade | PZ-0899-01 | FA-1200-01 | RP-03-2E |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Cimento CEM I 52.5 | kg/m ³ | 490 | 210 | 980 |
| Cinza Volante | kg/m ³ | 175 | 455 | 210 |
| Sílica Fume | kg/m ³ | 35 | 35 | 210 |
| Aglomerante | kg/m ³ | 700 | 700 | 1400 |
| Água | kg/m ³ | 280 | 280 | 350 |
| Relação a/c | - | 0,47 | 0,65 | 0,27 |
| Plastificante | % | 1 | 0,85 | 2,45 |
| Finos Siliciosos: 0 - 0,25mm | kg/m ³ | 500 | 468 | 118 |
| Areia: 0.2-0.6mm | kg/m ³ | 714 | 668 | 168 |
| Total de Agregados | kg/m ³ | 1214 | 1136 | 286 |

(Fonte: adaptado de Brockmann (2006))

Segundo Rizzo (2023), a mistura denominada como “PZ-0899-01” tornou-se para fins de pesquisa a matriz padrão da SFB 532 – Alemanha sendo utilizada em vários estudos como em Kulas (2023), Hinzen (2014) e Voss (2008). Ainda, Brockmann (2006) explicou que devido aos altos teores de ligantes que são utilizados afim de garantir a fluidez do concreto, possuem menores valores de módulo de elasticidade comparado ao concreto convencional. Os resultados da resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade das matrizes estudada pela autora estão demonstrados na tabela 2.3.

Tabela 2.3. Parâmetros das misturas analisadas.

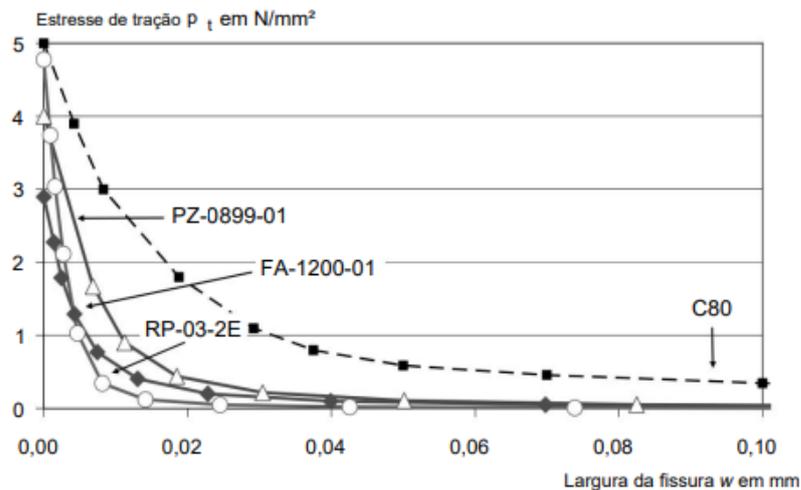
| Parâmetros | Unidade | PZ-0899-01 | FA-1200-01 | RP-03-2E |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Resistência à compressão | N/mm ² | 86 | 40 | 135 |
| Resistência à flexão | N/mm ² | 5,0 | 3,4 | 5,8 |
| Módulo de elasticidade | N/mm ² | 32000 | 22000 | 28500 |

(Fonte: Adaptado de Brockmann (2006))

Com melhores resultados em questões de resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade, a mistura denominada como “RP-03-2E” não foi comumente utilizada, pois obteve um comportamento de fratura menos dúctil que as demais misturas apresentadas. Segundo

Brockmann (2006), isso se deve ao alto teor de ligante e uma baixa quantidade de agregado composto na mistura. Este resultado foi analisado graficamente e está disposto na Figura 2.3.

Figura 2.3. Curva do concreto de granulometria fina.



(Fonte: Brockmann (2006))

Christ (2019) desenvolveu um método para determinar o traço ideal das matrizes do concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC). O método envolveu o traçado de uma curva granulométrica ideal, utilizando a equação de Funk e Dinger, de acordo com a faixa granulométrica estabelecida para o estudo. Posteriormente, foi desenhada uma nova curva granulométrica com base nos materiais analisados por Christ (2019), resultando em um Desvio de Empacotamento (IDE) considerado ideal, calculado pela diferença entre as curvas.

Foram criadas quatro misturas, denominadas "IDE87, IDE98, IDE118 e IDE133", com o objetivo de minimizar as diferenças entre as curvas, resultando em índices de empacotamento mais baixos e, conseqüentemente, maior resistência (Christ, 2019). Os resultados dessas misturas podem ser observados na Figura 2.4.

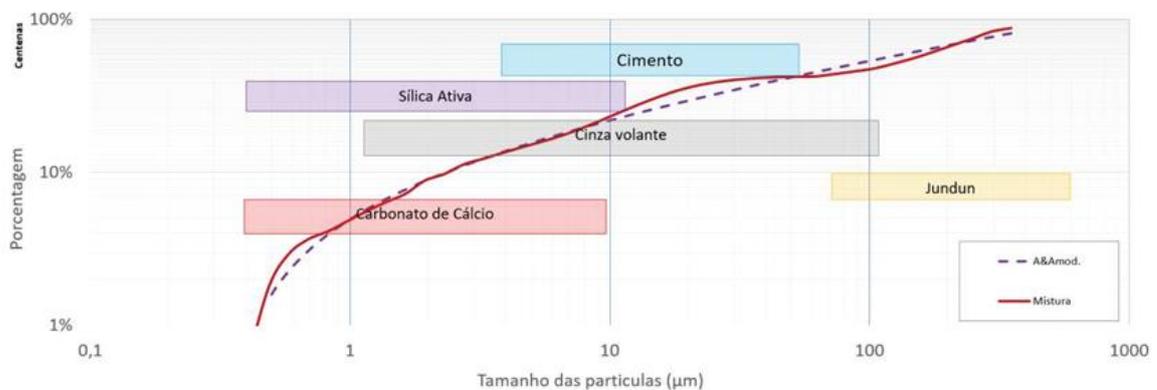
Figura 2.4. Composição das misturas analisadas.



(Fonte: Christ (2019))

Em comparação com as curvas de empacotamento do traço e as curvas de empacotamento ideal, Christ (2019) percebeu que a mistura IDE87 possuiu maior compacidade, ou seja, uma melhor trabalhabilidade e resistência. Na Figura 2.5, é possível identificar as proximidades das curvas, sendo possível definir a mistura como a melhor entre as outras.

Figura 2.5. Curvas de empacotamento ideal e da mistura IDE87.



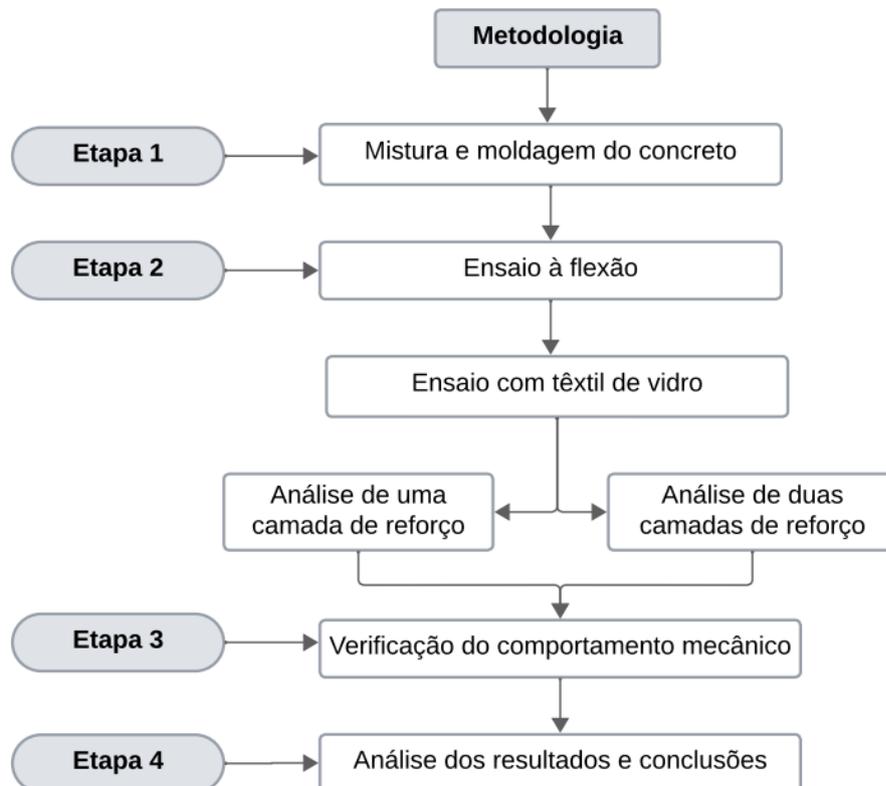
(Fonte: Christ (2019))

3 METODOLOGIA

A análise experimental constitui-se em uma das mais importantes etapas da engenharia estrutural (Beber, 2003), tendo um conjunto de processos que precisam de uma alta qualidade e precisão para gerar resultados significativos e de alta confiança. Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para análise de lajes de concreto têxtil em fibra de vidro, submetidas à flexão, apresentando todas as características do material definido e de todos os equipamentos utilizados para obtenção dos resultados. Portanto, este capítulo foi separado em quatro etapas, sendo elas: (i) definição da matriz cimentícia; (ii) definição da manta têxtil; (iii) ensaios; (iv) análise dos resultados. Na figura 3.1, é possível observar o planejamento seguido nesta pesquisa.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Figura 3.1. Planejamento da pesquisa.



(Fonte: Autor (2024))

3.2 DEFINIÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Pela utilização da manta têxtil definida, o concreto utilizado para as concretagens das lajes não poderia obter materiais graúdos por conta das dimensões das grades da manta. Com isso, foi definido que para esse tipo de material as características da argamassa deveriam ser autoadensáveis para se moldar com mais facilidade dentro da forma juntamente com a manta, sem a necessidade de vibrações posteriores.

Pensando nas características analisadas acima, foi definido que seria utilizado o método do concreto UHPC desenvolvido por Christ (2019) seguindo os mesmos materiais e estudos feitos por Rizzo (2023), sendo mais sustentável e com diminuição de desperdício dos materiais ao se realizar testes de traço.

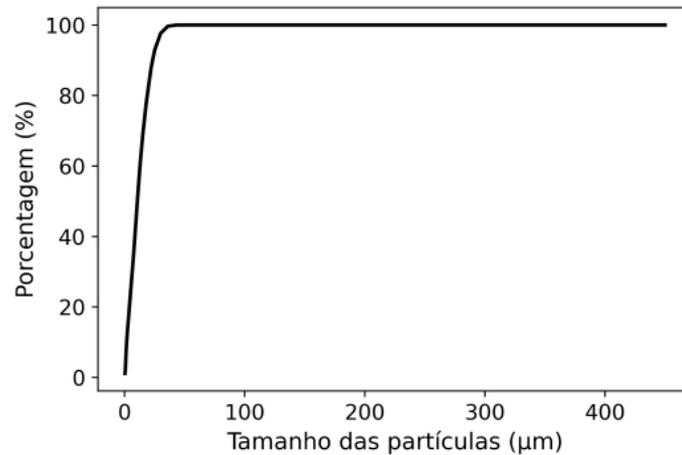
3.2.1 Caracterização dos materiais da matriz cimentícia

Para a definição da matriz, foi utilizada a composição desenvolvida por Rizzo (2023) sendo escolhidos os seguintes materiais: cimento CP V-ARI, sílica ativa, cinza volante, carbonato de cálcio e areia. Para a caracterização, Rizzo (2023) utilizou dois ensaios, sendo eles o de granulometria a laser e o ensaio de massa específica, ambos realizados na UFRGS.

3.2.1.1 Cimento

O cimento CP V-ARI, utilizado nesta pesquisa, é um cimento puro e que não apresenta adições pozolânicas conforme Romano (2009), tendo altas resistências e uma rápida secagem, agilizando a desforma das amostras. O cimento utilizado neste trabalho é o Cauê Estrutura. A Figura 3.2 apresenta a distribuição granulométrica do cimento utilizado.

Figura 3.2. Distribuição granulométrica do cimento.

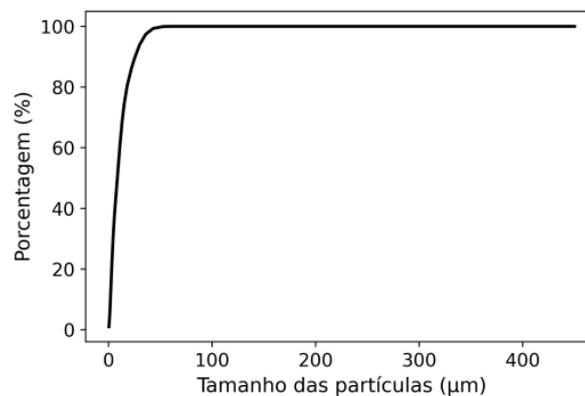


(Fonte: Rizzo (2023))

3.2.1.2 Sílica Ativa

A Sílica Ativa é um material pozolânico em pó ultrafino acinzentado, composto por partículas esféricas obtido a partir da fabricação do silício metálico ou ferro. Conforme descrito por Rizzo (2023), promove as reações de hidratação para a produção de compostos hidratados, aumentando as resistências mecânicas em todas as idades do concreto e argamassa, reduzindo a porosidade e controlando a coesão do concreto. A sílica escolhida é da empresa Tecnosil. A Figura 3.3 apresenta a distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada.

Figura 3.3. Distribuição granulométrica da Sílica Ativa.

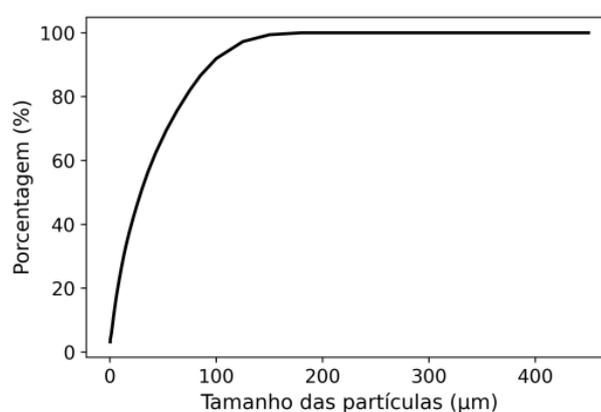


(Fonte: Rizzo (2023))

3.2.1.3 Cinza Volante

A cinza volante é um material pozolânico que contribui para a diminuição da temperatura da massa ocorrendo devido às reações de hidratação mais lentas. Além de diminuir o calor, essas reações lentas propiciam menor fissuração em idades precoces, conforme Witzke (2018). A cinza volante utilizada nesta pesquisa é da marca Pozo Fly e a sua distribuição granulométrica está apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4. Distribuição granulométrica da Cinza Volante.

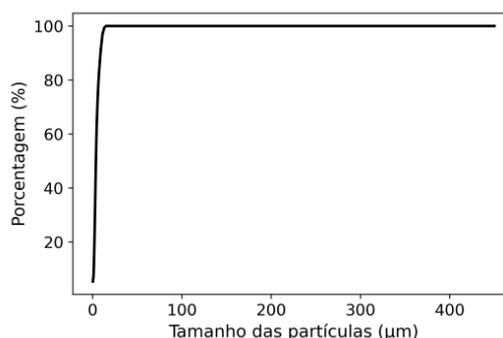


(Fonte: Rizzo (2023))

3.2.1.4 Carbonato de Cálcio

O carbonato de cálcio é derivado de rocha calcítica, finamente moído e apresenta excelente alvura (Christ, 2019). Além disso, possui baixa absorção de água, o que auxilia na compactação do concreto e contribui para uma maior fluidez (Rizzo, 2023). A Figura 3.5 ilustra a distribuição granulométrica do carbonato de cálcio utilizado.

Figura 3.5. Distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio.

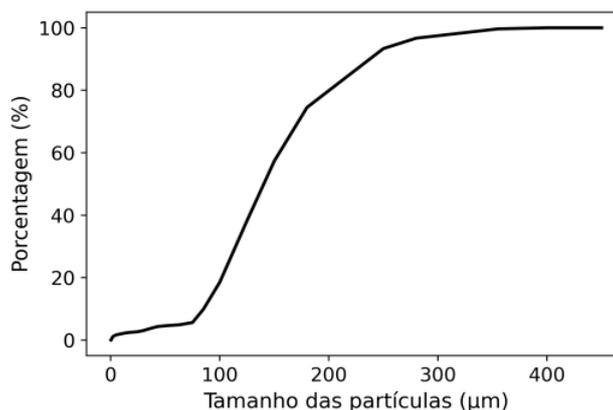


(Fonte: Rizzo (2023))

3.2.1.5 Areia

A areia escolhida para a pesquisa, seguiu o estudo de Rizzo (2023) utilizando uma areia fina, com granulometria máxima de até 400 μm . A Figura 3.6 apresenta a distribuição granulométrica da área utilizada.

Figura 3.6. Distribuição granulométrica da Areia.



(Fonte: Rizzo (2023))

3.3 MÉTODO DE DOSAGEM

O método de dosagem é uma etapa muito importante para a composição da matriz escolhida, ainda mais tratando-se de um concreto de alta resistência que necessita de granulometrias distintas para que não haja sobreposição dos grãos. Para isto, Christ (2019) desenvolveu alguns estudos através de elementos gráficos para obtenção da melhor curva de empacotamento para a mistura.

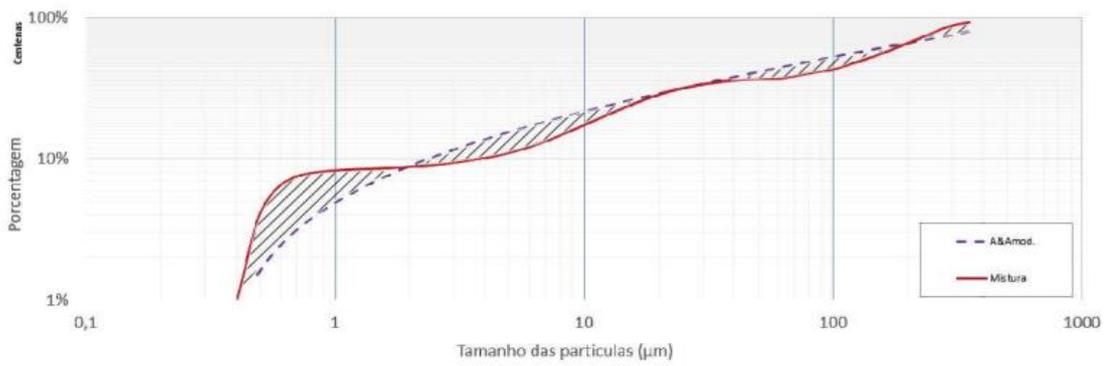
Utilizando a equação de Funk e Dinger, Christ (2019) chegou em uma curva de empacotamento que seria a ideal, sendo analisadas as porcentagens dos diâmetros que obteriam essa curva considerada perfeita. Para chegar nesse resultado, manteve-se a curva em um intervalo dos diâmetros de 0,34 μm a 704 μm e o valor de coeficiente de distribuição 0,20, pois foi o melhor apresentado entre as curvas de empacotamento (Christ, 2019).

Posteriormente, foi calculada a curva de empacotamento dos materiais analisados através da equação desenvolvida por Ferrara, Park e Shah (2007) onde são obtidos os diâmetros das fibras

no concreto autoadensável, sendo substituídos por agregados equivalentes. Essa equação foi desenvolvida com o intuito de encontrar a fibra ideal para utilização de revestimentos, sendo utilizados como agregados no método de dosagem.

Com as duas curvas obtidas, Christ (2019) encontra o índice de Desvio de Empacotamento (IDE) sendo determinada através da área existente entre as diferenças das curvas, conforme é mostrado na Figura 3.7.

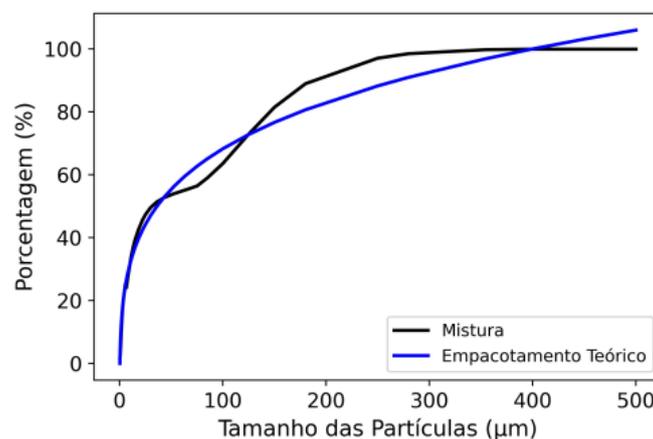
Figura 3.7. Área entre o empacotamento perfeito e o empacotamento da mistura.



(Fonte: Christ (2019))

Conforme descrito anteriormente no item 3.3, este trabalho utilizou os mesmos materiais da Rizzo (2023) sendo também aproveitados os dados e análises levantados para as curvas de empacotamento teórico e de mistura, já com as iterações necessárias para obtenção do melhor IDE sendo o mesmo igual a 114,2. As curvas analisadas estão dispostas na figura 3.8.

Figura 3.8. Empacotamento Teórico x Empacotamento da mistura.



(Fonte: Rizzo (2023))

Para a determinação do teor água/aglomerante, fixou-se a concentração de aditivo superplastificante “MC Powerflow 4000” em 3% (Rizzo, 2023), chegando em uma relação de 0,28 e sendo adequada para a utilização como reforço têxtil. Ainda, foi adicionado o modificador de viscosidade "Centrament Stabi 520" e o desincorporador de ar “Densil 10”.

Conforme Rizzo (2023), o aditivo modificador de viscosidade foi utilizado com o objetivo de promover melhor coesão entre as partículas da mistura, diminuindo as chances de segregação e retenção de água. Já o aditivo redutor de ar, foi adicionado para remover bolhas de ar.

Com o IDE calculado, seguindo os métodos de dosagem apresentados acima, Rizzo (2023) obtém a composição do traço da matriz utilizada que pode ser verificada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição da matriz utilizada.

| Materiais | Traço Unitário | Consumo (kg/m³) |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Cimento CPV ARI | 1 | 471,26 |
| Silica Ativa | 0,24 | 113,1 |
| Cinza Volante | 0,76 | 358,16 |
| Carbonato de Cálcio | 0,71 | 334,59 |
| Areia | 2,05 | 966,08 |
| Água/Aglomerante | 0,28 | 263,9 |
| Superplastificante | 3% | 28,28 |
| Modificador de Viscosidade | 1% | 9,43 |
| Desincorporador de ar | 1% | 9,43 |

(Fonte: Rizzo (2023))

3.3.1 Mistura do concreto

O concreto foi misturado em uma argamassadeira de vinte litros no laboratório do LEME, tendo como finalidade principal uma melhor mistura dos materiais. Para a adição desses materiais foi seguido o traço desenvolvido no trabalho de Rizzo (2023) sendo separado por quatro partes. Na primeira parte, foram adicionados todos os materiais secos sendo compostos por cinza volante, sílica, carbonato de sódio e areia, misturados por 2 minutos com a argamassadeira protegido com lona para diminuir a perda do material (Figura 3.9).

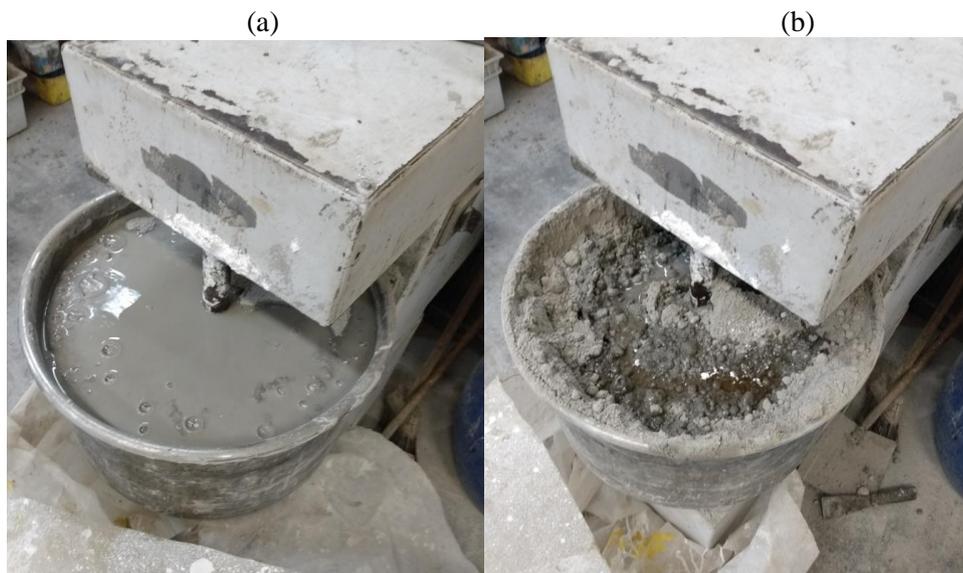
Figura 3.9. Argamassadeira protegida com lona para mistura dos materiais secos.



(Fonte: Autor (2024))

Na segunda parte, foi adicionado 90% da água total e misturado por mais dois minutos (Figura 3.10(a)). Posteriormente, na terceira parte, foi adicionado os 10% da água faltante junto com o superplastificante e o modificador de viscosidade (Figura 3.10(b)), misturando-se até abrir a argamassa, tendo um tempo de espera em aproximadamente 15 minutos.

Figura 3.10. Adição de 90% de água (a) e adição de 10% de água, superplastificante e modificador de viscosidade (b).



(Fonte: Autor (2024))

Por fim, com o concreto já em seu aspecto fluido (Figura 3.11(a)), foi adicionado o desincorporador de ar misturando-se por mais dois minutos (Figura 3.11(b)).

Figura 3.11. Concreto em seu aspecto fluído (a) e adição do desincorporador de ar (b).



(Fonte: Autor (2024))

3.3.2 Moldagem

Para a moldagem, foram utilizadas 3 formas de 70 cm de comprimento com 30 cm de largura e 3 cm de espessura (Figura 3.12(a)), conforme feito por Kulas (2013). Para a inserção da manta a 2/3 da altura, as formas foram feitas em duas camadas. A primeira camada da forma, tem uma altura de 1 cm para inserção do reforço do têxtil onde é gerada uma máxima eficiência ao esforço. A outra camada da forma, contempla o restante da altura devidamente unida para finalização da concretagem, conforme ilustrado pelo corte na Figura 3.13.

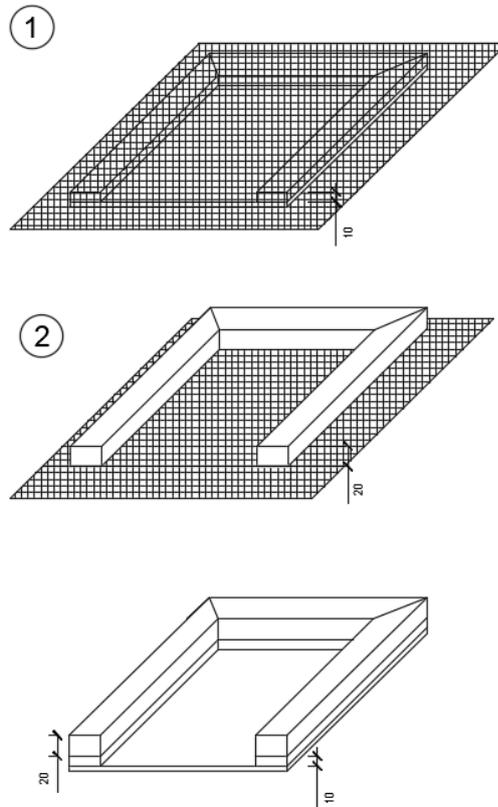
Ainda, foi utilizado desmoldante para a facilitação da desmontagem das peças nas etapas seguintes conforme mostrado na Figura 3.12(b).

Figura 3.12. Formas utilizadas (a) e as formas com desmoldante (b).



(Fonte: Autor (2024))

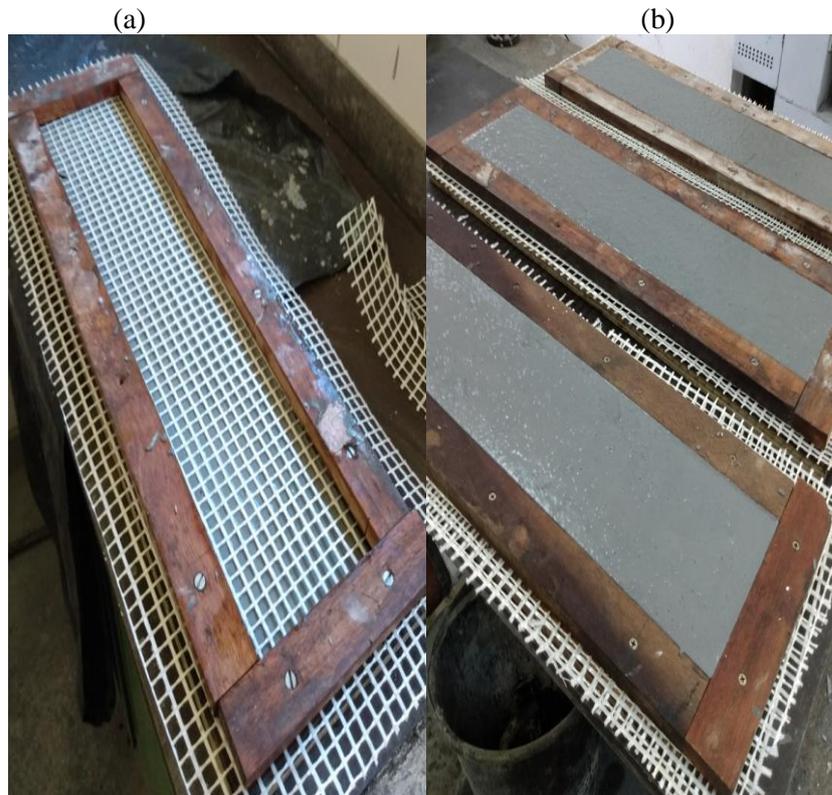
Figura 3.13. Corte da forma com o posicionamento do têxtil.



(Fonte: Autor (2024))

Para a concretagem, foi necessária a retirada das peças laterais superiores da forma para que a primeira camada de concreto fosse preenchida. Posteriormente, foram fixadas as peças novamente já com a manta inserida para finalização da concretagem (Figura 3.14(a)). Por ser autoadensável, o concreto se molda na forma ocupando todos os espaços disponíveis não precisando ser vibrado, conforme Figura 3.14(b).

Figura 3.14. Concreto juntamente com a manta têxtil (a) e a forma totalmente coberta de concreto (b).



(Fonte: Autor (2024))

Todas as formas foram colocadas sobre uma bancada (Figura 3.15), onde foi feita a inserção do concreto fluído por meio de uma colher de pedreiro convencional, que facilmente se preencheu entre os espaços do reforço. Por fim, todos os elementos devidamente preenchidos foram organizados para posteriormente serem colocados na câmara úmida.

Figura 3.15. Formas organizadas acima da bancada.

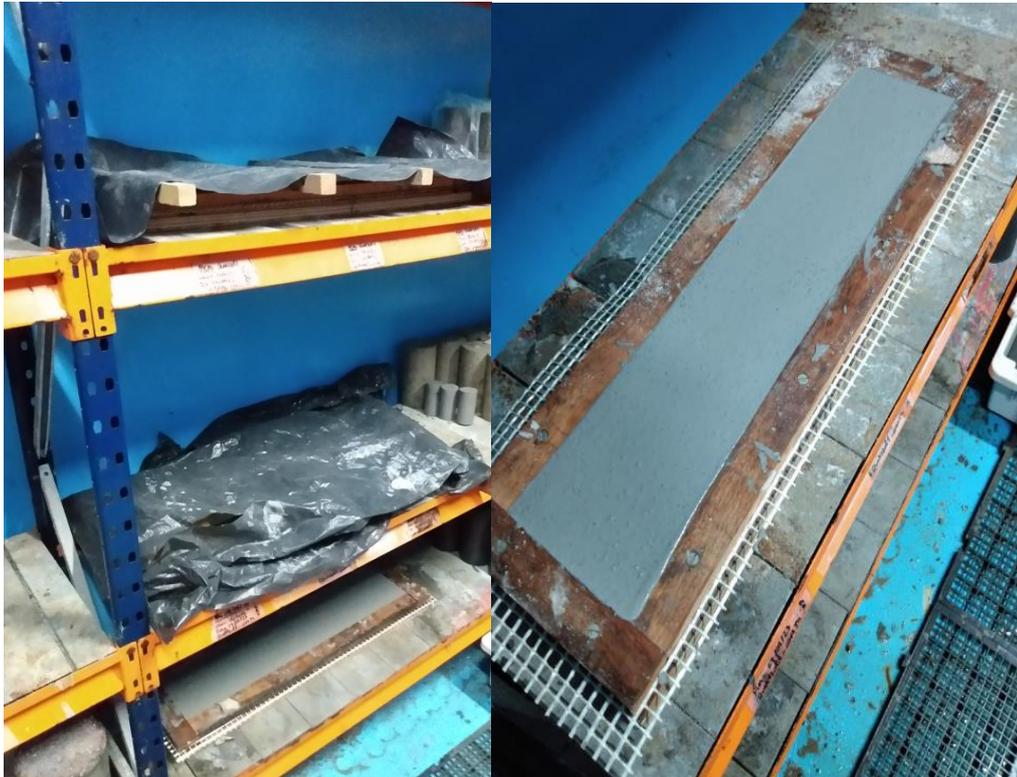


(Fonte: Autor (2024))

3.3.3 Cura do concreto

Visando uma melhor hidratação do concreto e consequentemente evitando fissuras e trincas, foi utilizada a câmara úmida do Laboratório LEME com uma umidade relativa de 95% por 28 dias, sendo coberto por lona (Figura 3.16(a)). Na Figura 3.16(b), é possível observar a peça concretada posicionada nas prateleiras da câmara úmida.

Figura 3.16. Elementos em câmara úmida coberto por lonas (a) e descoberta para melhor visualização (b).



(Fonte: Autor (2024))

Com as concretagens das próximas amostras com duas camadas de manta têxtil, foi necessário a desforma dos primeiros lotes (Figura 3.17). Posteriormente, foram realocadas em câmara úmida cobertas novamente com lonas.

Figura 3.17. Peças desformadas em câmara úmida.



(Fonte: Autor (2024))

3.3.4 Propriedades da matriz no estado endurecido

Para definir a resistência da matriz, foram realizados ensaios de compressão aos 28 dias no laboratório LEME da UFRGS utilizando a prensa SHIMADZU na qual possui uma capacidade de carga de 2000 kN. Para isto, foram feitos corpos de provas cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura sendo todos identificados, seguindo a NBR 5739 (2018) (Figura 3.18).

Figura 3.18. Corpos de provas cilíndricos.

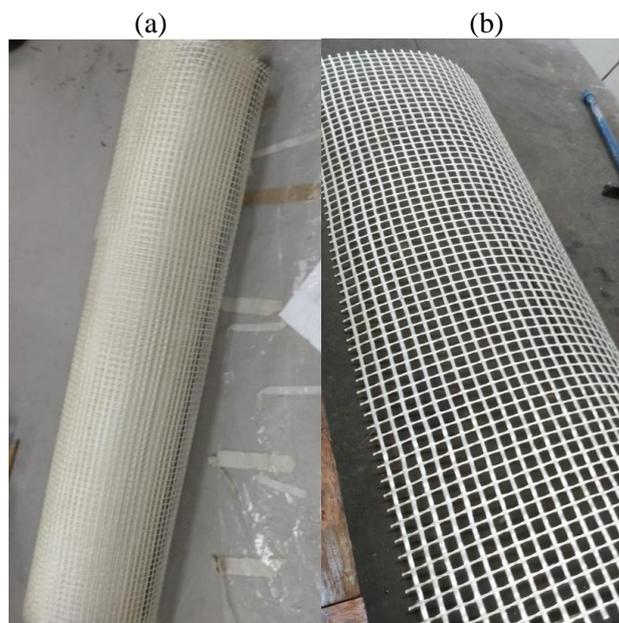


(Fonte: Autor (2024))

3.4 REFORÇO TÊXTIL

A fibra de vidro álcali-resistente é disponibilizada em rolos (Figura 3.19(a)) de 1,30 m de largura com área transversal de $1,80 \text{ mm}^2$ e distância entre as grades de 10 mm (Figura 3.19(b)).

Figura 3.19. Têxtil de vidro em rolo (a) e Têxtil de vidro cortado para utilização (b).



(Fonte: Autor (2024))

Para os ensaios propostos, foi utilizado o têxtil de fibra de vidro álcali resistente conhecido como “AR-360” da empresa Texiglass, no qual se aproxima dos têxteis utilizados em pesquisas internacionais em termos de gramatura e resistência (Giese, 2019), com a posição dos fios no tecido em ardume conforme Dalazen (2021).

A utilização da fibra de vidro álcali resistente “AR-360” fornece vantagens em relação aos problemas enfrentados nas estruturas em concreto armado. Segundo o fabricante Texiglass, por ser álcali-resistente a estrutura é pouco atacada pela alcalinidade do cimento, mantendo a vida útil bem superior aos materiais concorrentes. Além de ser facilmente transportado, cortada e manuseada o têxtil é coberto por uma resina que não tem função estrutural, apenas é responsável por evitar que a tecelagem se desfaça com o manuseio, mas que por fim, acaba trazendo uma melhor aderência entre os fios (Giese, 2019).

O têxtil de vidro AR - 360, de 2400 tex, possui área de seção transversal do urdume igual a 1,80 mm² e distância axial entre as grades de 10 mm, disponibilizada em rolos de 1,30 m de largura (Rizzo, 2023). Algumas especificações técnicas fornecidas pela empresa *Texiglass* para o material ensaiado, pode ser verificado através da Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Especificação do têxtil de vidro AR.

| Tipo de tecelagem | Unidade | Giro Inglês |
|------------------------------------|------------------|--------------------|
| Peso | g/m ² | 360 |
| Número de fios de Urdume | Fios/cm | 0,75 |
| Número de fios de Trama | Fios/cm | 0,75 |
| Título de fio de Urdume | Tex | 2400 |
| Título de fio da Trama | Tex | 2400 |
| Largura | cm | 130 |
| Comprimento do rolo | m | 100 |
| Espessura sem resina | mm | 0,55 |
| Espessura com resina | mm | 1,15 |
| Carga de ruptura teórica do urdume | kgf/cm | 54 |
| Carga de ruptura teórica da trama | kgf/cm | 54 |
| Porcentagem resina em peso | % | 20 |

(Fonte: Adaptado de Texiglass (2023))

3.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Para a análise do comportamento mecânico das amostras reforçadas com têxtil de fibra de vidro, foram realizados ensaios de flexão, utilizando CPs com as mesmas características geométricas de Kulas (2013), sendo lajes com seção transversal retangular de 70 cm (Figura 3.20), espessura de 3 cm e base de 15 cm (Figura 3.21(a)). Foram realizados ensaios de flexão à quatro pontos. O reforço têxtil foi instalado a uma altura útil de 20 mm (Figura 3.21(b)) e a velocidade do teste a flexão foi de 3mm/min.

Figura 3.20. Comprimento do elemento revestido em têxtil.



(Fonte: Autor (2024))

Figura 3.21. Largura do elemento revestido em têxtil (a) e altura da manta (b).



(Fonte: Autor (2024))

Além do reforço com uma camada de têxtil nos elementos estruturais, também se optou por analisar com duas camadas sobrepostas, diferentemente do que foi apresentado no trabalho de Kulas (2013), em que se colocou duas camadas próximas.

3.5.1 Procedimento de ensaio

Os ensaios de flexão foram feitos no laboratório LEME da UFRGS em uma prensa com capacidade de 2000 kN no dia 26 de setembro de 2023, tendo mais de 28 dias de cura e velocidade de deslocamento em 3 mm/min. Seguindo o estudo proposto por Kulas (2013), trata-se de um ensaio de quatro pontos onde a carga crescente é aplicada nos dois terços do elemento biapoiado, conforme Figura 3.22.

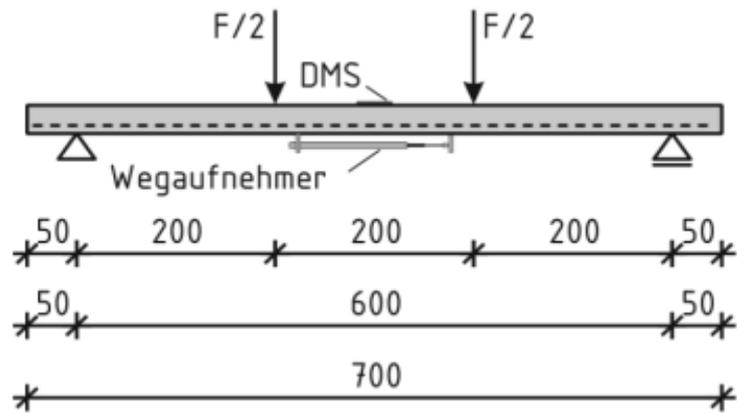
Figura 3.22. Posicionamento do elemento na prensa.



(Fonte: Autor (2024))

Para a posição dos apoios e forças aplicadas, seguiu-se as medidas propostas por Kulas (2013) (Figura 3.23), sendo marcadas por caneta vermelha com uma linha aparente para melhor visualização e ajustes dos pinos de carga e apoio, conforme Figura 3.24.

Figura 3.23. Marcações dos apoios e forças aplicadas.



(Fonte: Kulas (2013))

Figura 3.24. Marcações dos apoios pelo autor.



(Fonte: Autor (2024))

Para as medições do deslocamento, inicialmente foram utilizados dois *Linear Variation Displacement Transducer* (LVDT) da marca HBM, com curso +/- de 10 mm e com precisão de 0,01 mm em ambos os lados localizados na região da seção transversal central da laje (Figura 3.25), obtendo assim duas medidas para a mesma peça trazendo uma melhor confiabilidade nos resultados. Com base nos resultados obtidos, os deslocamentos superiores a 10 mm impossibilitaram uma análise completa das forças e deslocamentos suportados pela peça. Posteriormente, para as peças com duas camadas têxteis, foram utilizadas LVDTs de +/- 50 mm, permitindo uma melhor reprodução de todo o esforço suportado até o momento do rompimento da peça.

Figura 3.25. Posicionamento dos LVDT's na região central da seção.



(Fonte: Autor (2024))

3.5.2 Variáveis do ensaio experimental

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com o planejamento descrito abaixo, seguindo a data de concretagem.

- (a) 3 amostras do concreto com reforço de uma camada de manta têxtil de fibra de vidro álcali resistente “AR-360”, concretada no dia 16 de agosto de 2023;
- (b) 3 amostras do concreto com reforço de duas camadas de manta têxtil de fibra de vidro álcali resistente “AR-360”, concretada no dia 23 de agosto de 2023.

Para melhor entendimento nas análises dos ensaios à flexão, foi definida a nomenclatura AXVCX para cada peça analisada sendo o primeiro “X” o número da amostra, o “V”

identificando o tipo de fibra utilizado, o “C” seria a camada e o último “X” seria a quantidade de camadas de manta têxtil que está sendo analisado.

No Quadro 3.1, estão explicitadas todas as amostras que foram desenvolvidas conforme nomenclatura citada,

Quadro 3.1. Nomenclatura das amostras.

| Amostras com uma camada | Amostras com duas camadas |
|--------------------------------|----------------------------------|
| A1VC1 | A4VC2 |
| A2VC1 | A5VC2 |
| A3VC1 | A6VC2 |

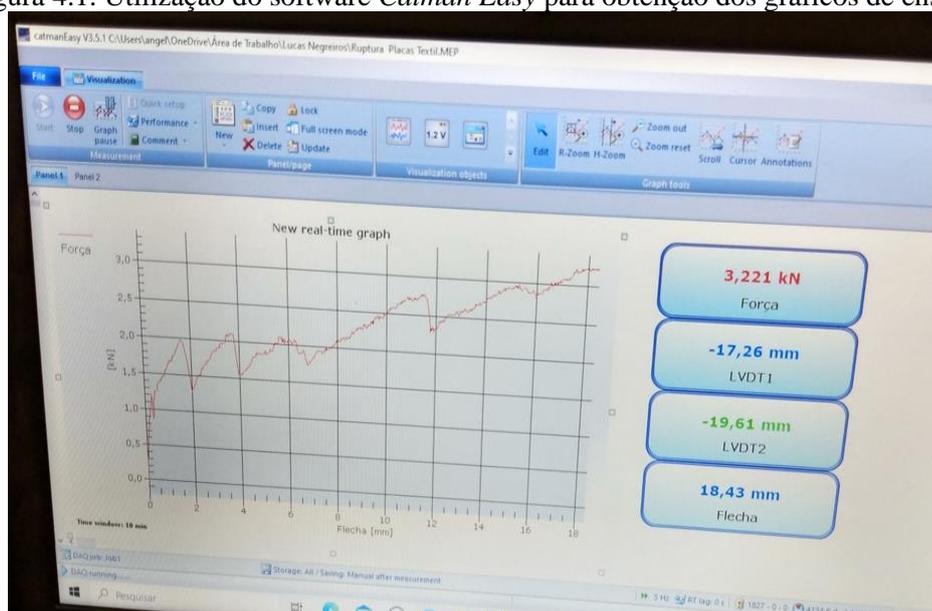
(Fonte: Autor (2024))

4 RESULTADOS

Este capítulo abrange todos os resultados obtidos por meio das análises experimentais dos ensaios de flexão do concreto reforçado com uma e duas camadas de fibra de vidro "AR-360". Também serão abordados os resultados obtidos nos ensaios de compressão do concreto fino de alta resistência, seguindo o mesmo traço proposto por Rizzo (2023).

A obtenção dos dados foi obtida através do *software Catman Easy* (Figura 4.1) e da prensa SHIMADZU, adotando-se uma velocidade de ensaio de 3 mm/min. As peças foram devidamente marcadas em seus pontos de apoio e carga, seguindo as mesmas especificações dos ensaios realizados por Kulas (2013). Para os deslocamentos foram utilizadas duas leituras de LVDTs em ambos os lados centrais da peça. Este processo foi citado no capítulo 3 desta pesquisa.

Figura 4.1. Utilização do software *Catman Easy* para obtenção dos gráficos de ensaio.



(Fonte: Autor (2024))

Para as análises gráficas, verificou-se a curva força *versus* deslocamento levando em consideração as transições de estádios obtidos nos ensaios das peças. Ainda, seguindo Kulas (2013), foram analisados os tipos de fissuras e rupturas que foram observados durante o processo de ensaio à flexão dos corpos de prova.

4.1 CONCRETO

Para os ensaios de compressão, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos, cada um com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, seguindo as respectivas concretagens das lajes. Os primeiros 3 CPs foram moldados simultaneamente à concretagem das primeiras lajes, que continham uma camada de manta têxtil. Os outros 3 CPs foram moldados durante a concretagem da segunda amostra de lajes, as quais continham duas camadas de mantas têxteis. Assim, o ensaio de compressão foi realizado para as amostras de uma manta ao 42º dia e para as amostras com duas mantas foi realizado ao 35º dia, no laboratório do LEME na UFRGS.

Para os ensaios, foi utilizada a prensa SHIMADZU, conforme descrito no item 3.4.3, com uma velocidade de aplicação de carga de 0,45 MPa/s, especificado na norma ABNT NBR 5759. Como esperado, a resistência média de compressão foi de 92 MPa, e os resultados encontrados estão detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultado dos ensaios de compressão.

| Amostras | CPs 1 | CPs 2 |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Dias após concretagem | 42 | 35 |
| Resistência [MPa] | 80,5 | 101,5 |
| Resistência [MPa] | 82,6 | 94,3 |
| Resistência [MPa] | 88,5 | 104,2 |
| Média [MPa] | 84 | 100 |
| Média Geral [MPa] | 92 | |

(Fonte: Autor (2024))

Com os resultados apresentados, observou-se que o método de dosagem desenvolvido por Christ (2019) resultou em um concreto de alta resistência e com excelente capacidade de fluidez, o que o torna altamente aplicável em concreto têxtil.

Além disso, para fins de comparação, Rizzo (2023) testou a mesma matriz utilizada nesta pesquisa, porém com menor volume de materiais, e obteve uma média de resistência à compressão inferior àquela encontrada pelo autor. Na Tabela 4.2, estão apresentados alguns resultados dos ensaios de compressão.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de compressão de pesquisas anteriores.

| Pesquisas | fcm [MPa] |
|-------------------------------------|------------------|
| Mattarollo, Randl e Pauletta (2023) | 93,6 |
| Zhang e Deng (2022) | 90 (M3) |
| Valeri, Ruiz e Muttoni (2020) | 107,8 |
| Colombo et al. (2013) | 111,46 (F1) |
| Rizzo (2023) | 80,07 |

(Fonte: Autor (2024))

Com isso, observa-se que o resultado médio obtido pelo autor desta pesquisa é similar à alguns resultados anteriores de diversos autores, o que valida a qualidade da matriz escolhida para a presente pesquisa.

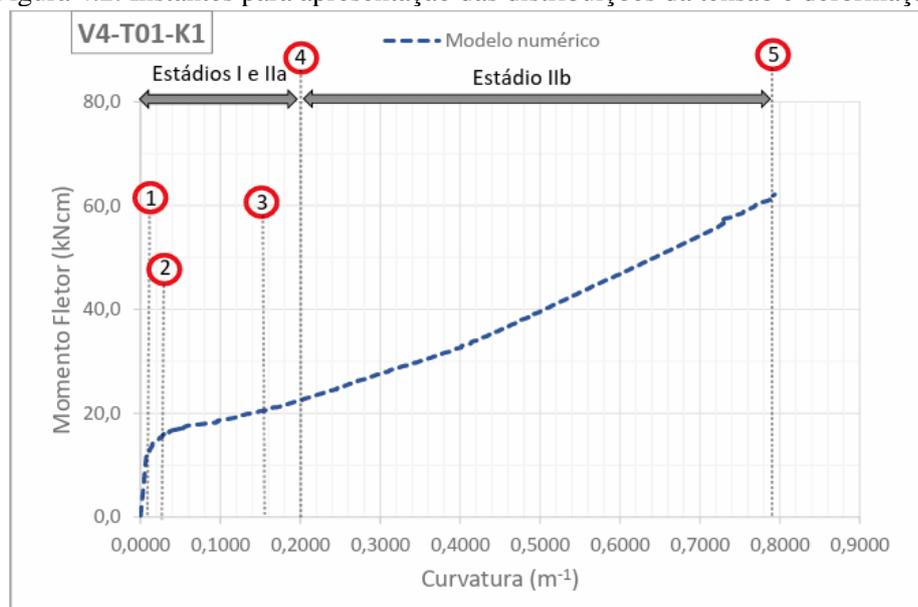
4.2 CONCRETO COM REFORÇO DA FIBRA DE VIDRO

Neste tópico, serão discutidos os resultados do comportamento mecânico obtido dos ensaios a flexão de lajes contendo uma ou duas camadas de manta têxtil de fibra de vidro álcali resistente “AR-360”. Para fins de análise, foi levado em consideração a divisão do comportamento segundo Araújo (2019), onde testes de flexão possuem os mesmos estádios I, IIa e IIb dos testes de tração. Sendo assim, seguiu-se a divisão explicitada por Araújo (2019) conforme abaixo:

- a) estágio I: Região onde o concreto ainda não iniciou o processo de fissuração. Apesar de haver em quase sua totalidade comportamento linear, destaca-se que, próximo da transição para o estágio IIa, ocorre uma região de não linearidade;
- b) estágio IIa: Nesta etapa inicia-se e desenvolve-se o processo de fissuração do concreto;
- c) estágio IIb: Na última etapa ocorre a estabilização da fissuração do concreto e o rompimento do elemento estrutural.

Na Figura 4.2, estão distribuídas as deformações do concreto seguindo as divisões de comportamento comentadas anteriormente. No tópico 4.2.2 está explicitado os gráficos das análises realizadas pelo autor, onde se nota uma certa semelhança dos resultados e divisões de comportamento.

Figura 4.2. Instantes para apresentação das distribuições da tensão e deformação.

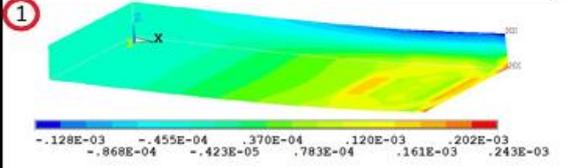
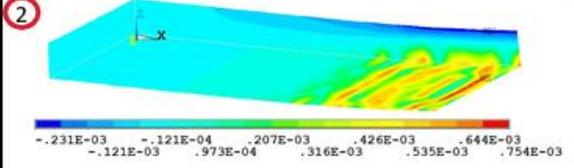
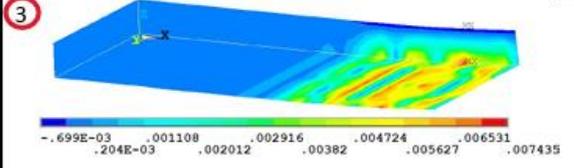
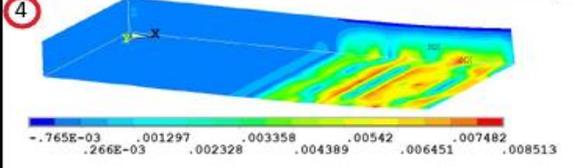
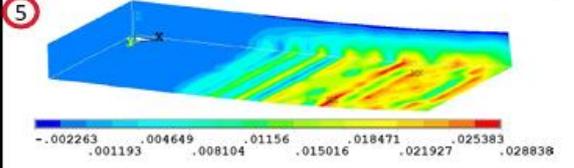


(Fonte: Araújo (2019))

No quadro 4.1, está sendo mostrado a evolução das distribuições de deformação. A primeira figura ilustra o início do processo de fissuração, onde ocorre a mudança do estágio I para estágio IIa. Posteriormente, com o desenvolvimento do processo de fissuração, aparecem as novas fissuras que estão sendo ilustradas nas figuras 2, 3 e 4. Nesta etapa, a resistência a tração da matriz é ultrapassada e começa a ser resistida apenas pelo reforço têxtil, que posteriormente, com a aderência dos filamentos, o esforço é novamente transferido para o concreto onde se inicia novamente o ciclo. Por fim, a figura 5 está ilustrando o estágio IIb, demonstrando o instante onde o têxtil é rompido, registrando o esgotamento de carga.

Este processo será discutido no item 4.2.2 com mais clareza e detalhes para as peças desenvolvidas pelo autor.

Quadro 4.1. Evolução das distribuições de deformação no concreto.

| Detalhes | Deformação em X no concreto (cm/cm) |
|---|--|
| Instante do início do processo de fissuração. Término do estágio I e início estágio IIa |  |
| Continuação do processo de fissuração. Estádio IIa. |  |
| Continuação do processo de fissuração, com aumento do número de fissuras. Estádio IIa. |  |
| Mudança do estágio IIa para IIb |  |
| Instante da ruptura do elemento em TRC. Fim do estágio IIb. |  |

(Fonte: Araújo (2019))

4.2.1 Análise das rupturas e trincas

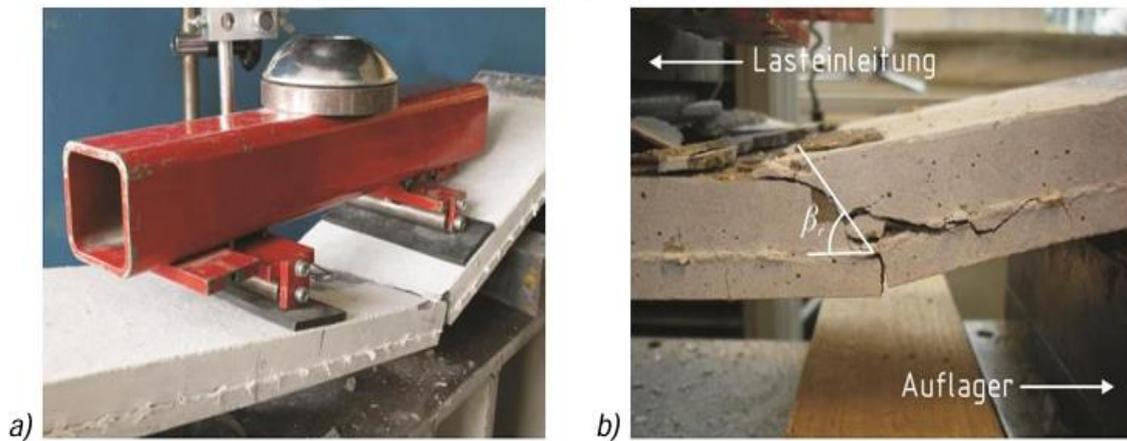
Para análise dos resultados obtidos através de ensaios a flexão das lajes, primeiramente analisou-se o tipo de ruptura que ocorreu nos CP's testados. Segundo Kulas (2013) ocorre dois tipos de ruptura sendo elas por Flexão quando o tecido têxtil é rompido (Figura 4.3(a)), ou por Cisalhamento que ocorre quando o concreto rompe (Figura 4.3(b)), ou seja, foi excedido a resistência a tração o que não ocorre no têxtil que resistiu. Para os ensaios aplicados para esta pesquisa, notou-se os mesmos tipos de ruptura analisado por Kulas (2013) (Figura 4.4), onde se nota uma veracidade nos resultados obtidos.

Figura 4.3. Ruptura por flexão (a) e ruptura por cisalhamento (b).



(Fonte: Autor (2024))

Figura 4.4. Análise de ruptura por Kulas (2013).



(Fonte: Kulas (2013))

Outra análise importante que foi observada, trata-se das trincas de ruptura que ocorre por toda a laje analisada. Primeiramente, aparecem as trincas de flexão bem no centro das lajes, conforme mostrada na Figura 4.5 e acabam se deslocando em direção as áreas de aplicações de carga. Posteriormente, ocorre uma fissuração acima do nível da manta, onde ocorre a ruptura por cisalhamento dependendo do nível de reforço utilizada.

Figura 4.5. Fissurações por flexão e deslocamento para área de carga.



(Fonte: Autor (2024))

4.2.2 Concreto reforçado com uma camada de têxtil de vidro

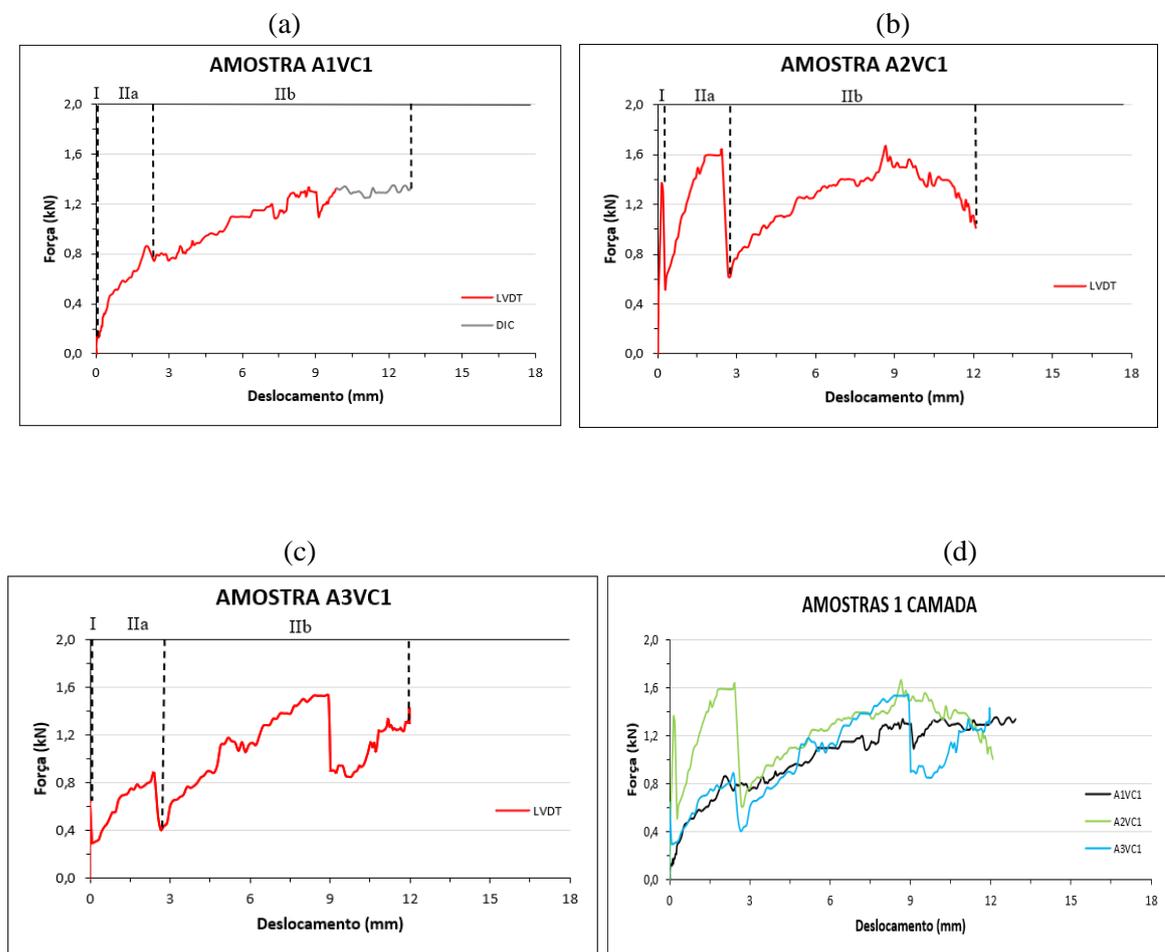
Neste tópico, serão discutidos os resultados obtidos nas amostras com uma camada de reforço têxtil de vidro. Para facilitar o entendimento e a localização dos resultados de cada corpo de prova, foi utilizado a nomenclatura descrita na seção 3.6.3, sendo designadas como A1VC1 (Figura 4.6 (a)), A2VC1 (Figura 4.6(b)) e A3VC1 (Figura 4.6(c)) para essas amostras.

Conforme discutido na seção 4.2, a análise das lajes é dividida em três estágios. No estágio I, ainda não ocorreu a fissuração, o que aumenta a resistência e a capacidade de carga. No estágio IIa, as primeiras fissuras aparecem, pois a resistência à tração da matriz é ultrapassada e começa a ser suportada apenas pelo material têxtil. Com a aderência dos filamentos da fibra à matriz, o esforço é novamente transferido para a matriz, com valores superiores à sua resistência, resultando em um ciclo repetitivo até que as fissuras se estabilizem, atingindo o estágio IIb, onde não influenciam mais no desempenho do elemento estrutural, que passa a ser sustentado apenas pelo material têxtil (Peled, Bentur e Mobasher, 2017, p. 167-168; Hegger et al., 2006, p. 135).

Nas amostras gráficas representadas nas figuras 4.6(a), 4.6(b) e 4.6(c), observa-se um processo de fissuração e ruptura semelhante, embora com diferentes forças e deslocamentos. Nas amostras A2VC1 e A3VC1, é mais evidente a divisão em estágios, com o rompimento do concreto ocorrendo praticamente simultaneamente e com as mesmas forças aplicadas. Ainda,

na figura 4.6(d) está explicitado todas as amostras para uma melhor visualização do desempenho ao longo da força aplicada. Na seção 3.6.2, foi mencionada a limitação da análise devido ao uso de dois LVDTs que não conseguiram realizar todas as medições do ensaio. Além disso, juntamente com a avaliação gráfica obtida da prensa, também foi realizada uma análise com captura de imagem para fins de outra pesquisa. Assim, foi utilizada a medição realizada pela DIC e inserida no gráfico da amostra A1VC1, destacada em cinza, a fim de concluir a análise abrangente da peça.

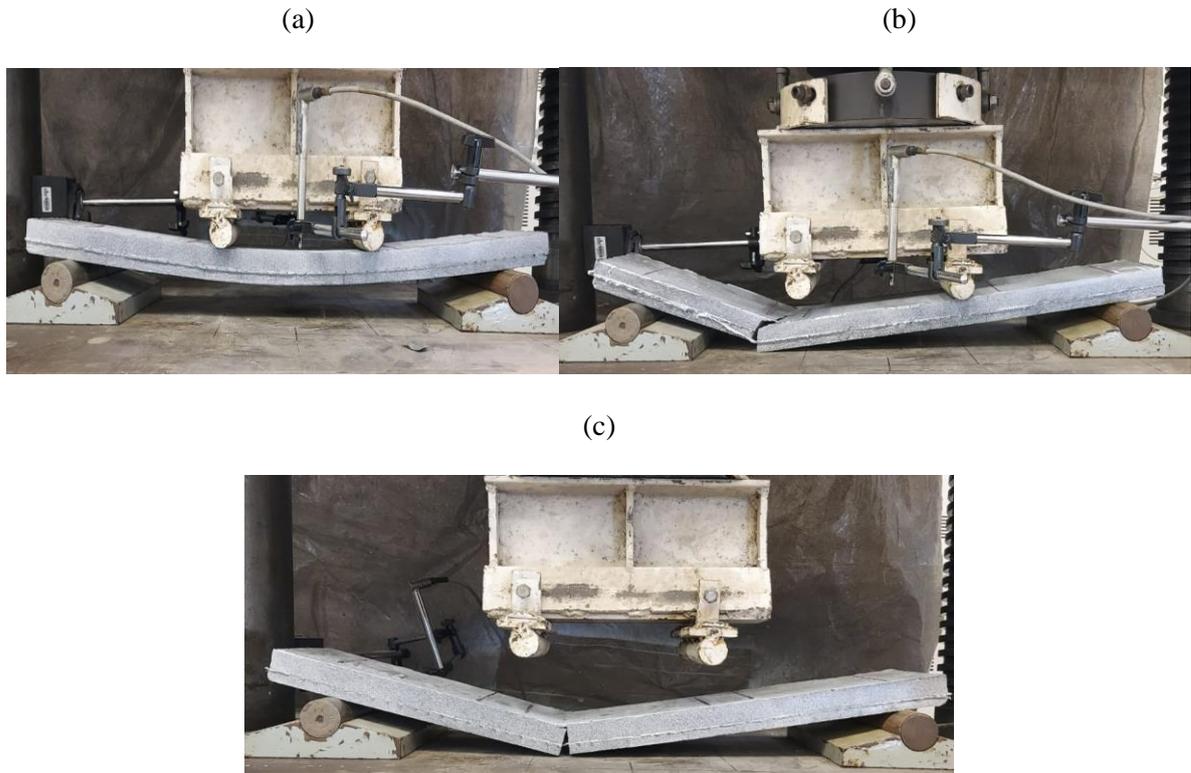
Figura 4.6. Amostra A1VC1 (a), amostra A2VC1 (b), amostra A3VC1 (c) e todas as amostras (d).



(Fonte: Autor (2024))

Nas figuras 4.7(a), 4.7(b) e 4.7(c), as peças demonstram a análise identificada por Kulas (2013), onde foram obtidos os dois tipos de ruptura, tanto à flexão quanto ao cisalhamento. A amostra A1VC1 não foi prolongado até a sua ruptura por questões de perda de leitura dos LVDTs, onde foi imediatamente encerrada a aplicação da força aplicada sobre o elemento.

Figura 4.7. Amostra A1VC1 (a), amostra A2VC1 (b) e amostra A3VC1 (c).



(Fonte: Autor (2024))

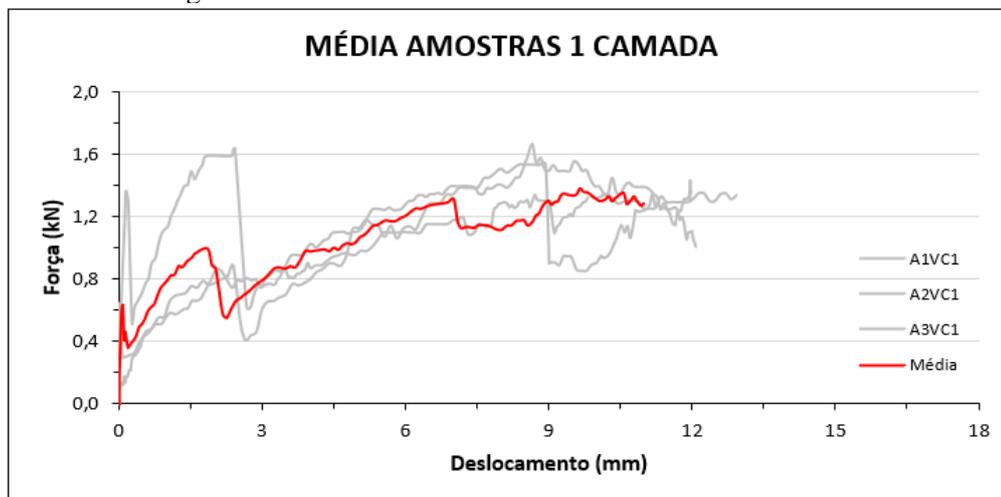
Na Tabela 4.3, foram registradas a força máxima e o deslocamento máximo suportados por cada amostra analisada, revelando uma proximidade nos resultados obtidos, o que indica variações nos estágios de fissuração. Além disso, na Figura 4.8, é apresentado o gráfico com as médias das três amostras diferenciada pela cor vermelha.

Tabela 4.3. Resultados máximos obtidos por outros autores.

| Amostra | Força [kN] | Deslocamento [mm] |
|----------------|-------------------|--------------------------|
| A1VC1 | 1,33 | 12,93 |
| A2VC1 | 1,50 | 12,08 |
| A3VC1 | 1,54 | 11,98 |
| Média | 1,46 | 12,33 |

(Fonte: Autor (2024))

Figura 4.8. Gráfico da média das amostras de uma camada.



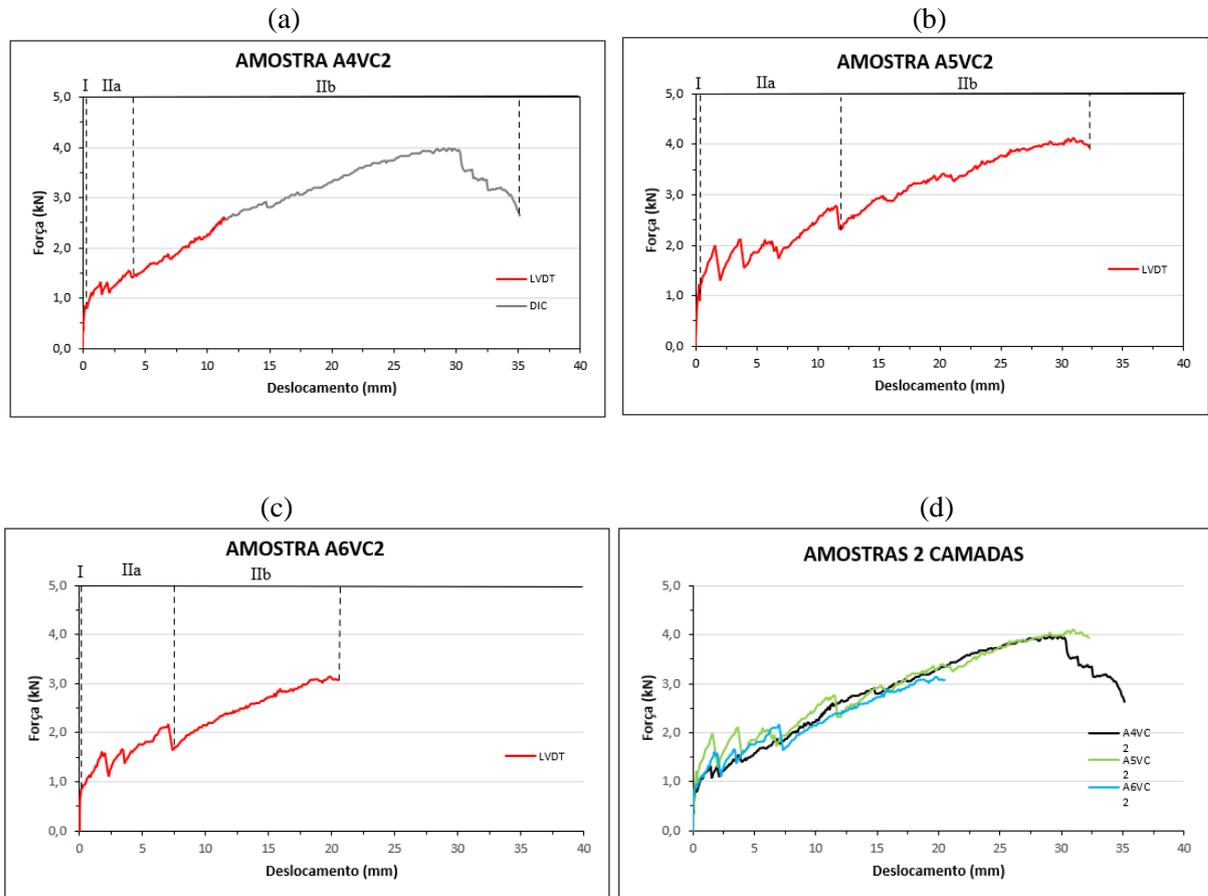
(Fonte: Autor (2024))

4.2.3 Concreto reforçado com duas camadas de têxtil de vidro

Neste tópico, serão discutidos os resultados obtidos nas amostras com duas camadas de reforço têxtil de vidro. Para facilitar o entendimento e a localização dos resultados de cada corpo de prova, foi utilizado a nomenclatura descrita na seção 3.6.3, sendo designadas como A4VC2 (Figura 4.9(a)), A5VC2 (Figura 4.9(b)) e A6VC2 (Figura 4.9(c)) para essas amostras.

Conforme mencionado anteriormente no item 4.4.2, as divisões de estádios para as amostras com uma camada de reforço têxtil não são visualmente compreensíveis. Para as amostras com reforço em duas camadas de têxtil, o comportamento mecânico das estruturas foi mais claramente definido, com quase todas as peças desta amostra seguindo um processo semelhante. Inicialmente, todas as peças apresentam um Estágio I bem definido, com um aumento de carga praticamente uniforme até o início das primeiras fissuras, marcando o início do Estágio IIa. Observa-se que, até a estabilização das fissuras, ocorrem repetições de processos, alternando entre fissuração e estabilidade até o início do Estágio IIb. Por fim, há um aumento no deslocamento de flexão das peças com a estabilidade das fissuras, que se mantém até o momento do rompimento.

Figura 4.9. Amostra A4VC2 (a), amostra A5VC2 (b), amostra A6VC2 (c) e todas as amostras (d).

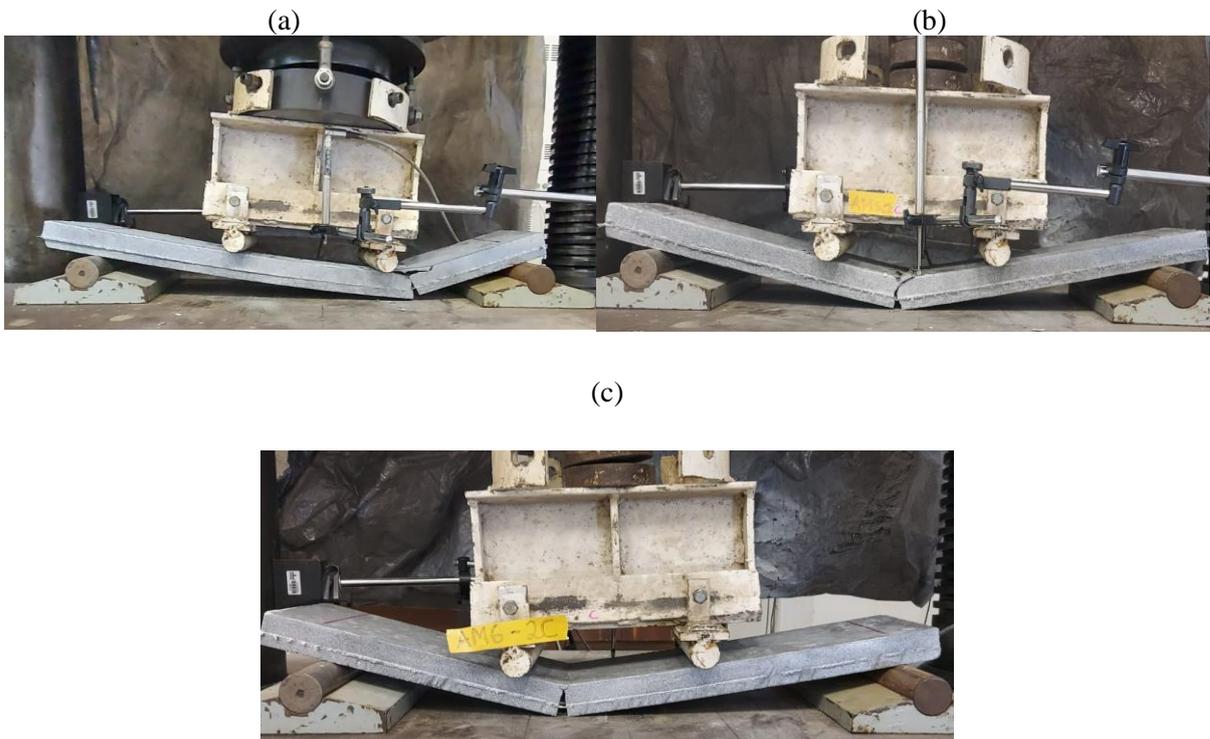


(Fonte: Autor (2024))

Com o aumento da camada de reforço, obteve-se uma resistência superior ao analisado anteriormente com apenas uma camada de têxtil, duplicando seu valor de carga e deslocamento. Com isso, nota-se uma veracidade nos dados obtidos o que também é percebido por uma maior resistência à compressão do próprio concreto analisado no item 4.1. Na seção 3.6.2 e no item anterior deste capítulo, foi mencionada a limitação da análise devido ao uso de dois LVDTs que não conseguiram realizar todas as medições do ensaio. Assim, foi utilizada a medição realizada pela DIC e inserida no gráfico da amostra A4VC2, destacada em cinza, a fim de concluir a análise abrangente da peça.

Na Figura 4.10(a), 4.10(b), 4.10(c), conforme citado no t3pico 4.4.2 as pe7as demonstram a an3lise identificada por Kulas (2013), onde ocorre os dois tipos de ruptura, tanto 3 flex3o quando ao cisalhamento.

Figura 4.10. Amostra A4VC2 (a), amostra A5VC2 (b) e amostra A6VC2 (c).



(Fonte: Autor (2024))

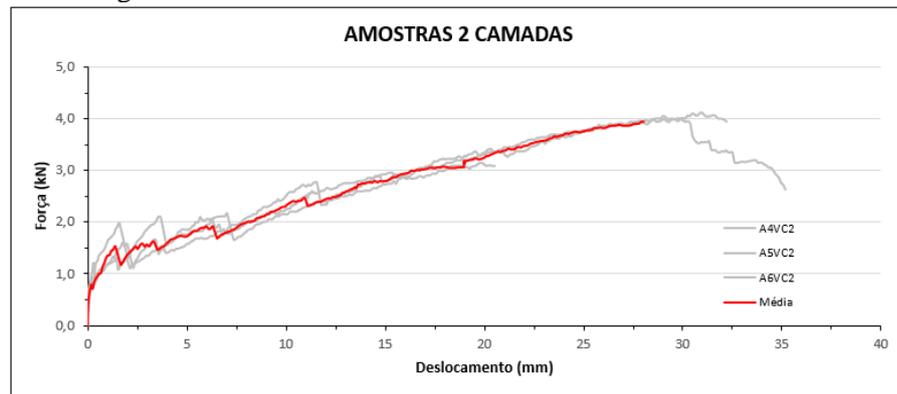
Na Tabela 4.4, foram registradas a for7a m3xima e o deslocamento m3ximo suportados por cada amostra analisada para o refor7o com duas mantas t3xteis, revelando uma proximidade nos resultados obtidos e o dobro de for7a e deslocamento que foi encontrado na tabela XX, trazendo uma melhor distribui73o estrutural da pe7a. Al3m disso, na Figura 4.11, 3 apresentada o gr3fico com as m3dias das tr3s amostras diferenciada pela cor vermelha.

Tabela 4.4. Resultados m3ximos obtidos para cada amostra.

| Amostra | For7a [kN] | Deslocamento [mm] |
|----------------|-------------------|--------------------------|
| A4VC2 | 3,98 | 35,15 |
| A5VC2 | 4,11 | 33,23 |
| A6VC2 | 3,15 | 20,60 |
| M3dia | 3,75 | 29,66 |

(Fonte: Autor (2024))

Figura 4.11. Gráfico da média das amostras de duas camadas.

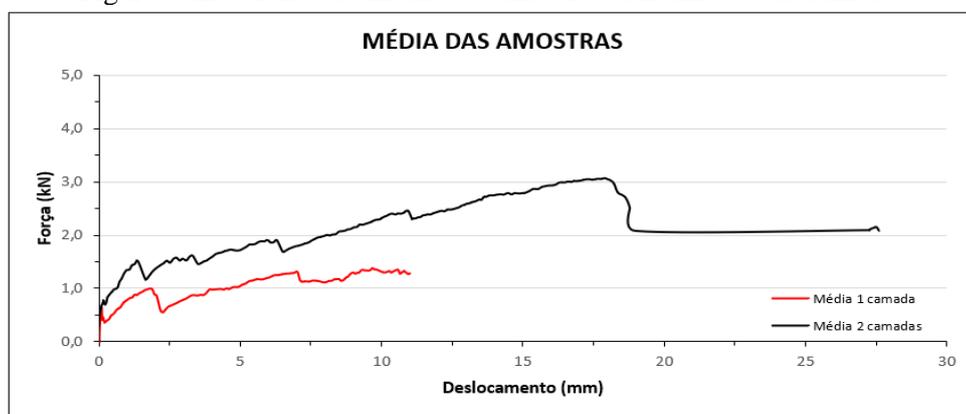


(Fonte: Autor (2024))

4.2.4 Análise do concreto reforçado com uma e duas camadas de têxtil de vidro

Neste tópico, serão discutidos os resultados obtidos das médias das amostras com uma e duas camadas de reforço. Os resultados de cada amostra estão diferenciados pela cor vermelha para uma camada e preta para duas camadas, conforme mostrado na Figura 4.12.

Figura 4.12. Gráfico da média das amostras com uma e duas camadas.



(Fonte: Autor (2024))

Ao analisar graficamente as duas médias (Figura 4.12), observa-se uma semelhança nos resultados em termos de deslocamento, sendo diferenciados pela força aplicada. No Estágio I, foi obtido a mesma força e deslocamento para ambas as análises, chegando a forças aplicadas em torno de 1 kN. No estágio IIa, percebe-se que, com o início das fissuras, ocorre uma queda brusca em relação à amostra com uma camada de reforço, e logo em seguida as forças aplicadas divergem entre si. Já com a estabilidade das fissuras no Estágio IIb, as duas amostras seguem o

mesmo deslocamento com cargas diferentes até a ruptura das peças com uma camada de reforço. Além disso, nas amostras com duas camadas, ocorre mais um pico de estabilidade, onde a carga suportada e seu deslocamento dobram até a ruptura.

Na Tabela 4.5, são apresentados a força máxima e o deslocamento máximo suportados por cada amostra analisada para o reforço com uma e duas mantas têxteis. Observa-se que a diferença entre as amostras com uma e duas camadas dobra em termos de força e deslocamento, o que confere confiabilidade aos dados obtidos.

Tabela 4.5. Resultados máximos obtidos para cada amostra com uma e duas camadas de reforço.

| Amostra | Força [kN] | Deslocamento [mm] |
|----------------|-------------------|--------------------------|
| A1VC1 | 1,35 | 12,13 |
| A2VC1 | 1,67 | 8,66 |
| A3VC1 | 1,43 | 11,97 |
| A4VC2 | 3,98 | 29,08 |
| A5VC2 | 4,12 | 30,96 |
| A6VC2 | 3,15 | 19,80 |

(Fonte: Autor (2024))

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões da pesquisa experimental a partir da análise dos resultados obtidos. Ainda, são sugeridas algumas sugestões de pesquisas para continuação do estudo em relação ao tema abordado.

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento mecânico do concreto têxtil reforçado com fibra de vidro com uma e duas camadas, através dos gráficos de força *versus* deslocamento, partindo de uma pesquisa experimental com materiais nacionais. Este experimento foi realizado no laboratório do LEME na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Além da utilização dos reforços têxteis, foi utilizado o método de dosagem proposto por Christ (2019) e que foi estudado e ajustado por Rizzo (2023), obtendo uma melhor composição para a matriz cimentícia. A partir deste método, foi possível obter um concreto autoadensável com ótimas resistências mecânicas, com resultados satisfatórios ao comparar com outras pesquisas, citadas no item 4.1.

Ainda, uma vantagem desta pesquisa foi em relação ao estudo da matriz, no qual foram aproveitados os materiais secos e os aditivos que Rizzo (2023) utilizou. Além disso, a mistura foi realizada seguindo os mesmos processos e argamassadeira, sendo possível obter uma comparação de resultados como base deste trabalho.

Nos ensaios das peças reforçadas com uma de fibra de vidro, foi possível notar a semelhança de resultados que foram obtidos em relação a pesquisas anteriores, tendo como referência Kulas (2013). Como verificado, todas as lajes analisadas com reforço têxtil, apresentaram a formação de múltiplas fissuras, caracterizado pelo aumento da capacidade que é resistida pelo reforço empregado após a ruptura da matriz cimentícia. Para as peças reforçadas com duas camadas de fibra de vidro, todas obtiveram um aumento significativo em relação à força e deslocamento resistido.

Com os resultados obtidos, conclui-se que o material utilizado como reforço para as lajes estudadas obteve resultados satisfatórios, notando-se um grande aumento de capacidade de carga com a adição de mais uma manta. Ainda, o fornecimento de uma grande capacidade estrutural juntamente com a inovação e sustentabilidade, garantem o desenvolvimento necessário visando um futuro mais sustentável e tecnológico.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com uma nova oportunidade de conhecimento que é fornecida por este assunto inovador, o aumento de dados que é adquirido por pesquisas sobre este material com suas aplicabilidades na construção civil é de grande importância para análises de comparações e veracidade dos dados que estão sendo obtidos.

Com isso, algumas sugestões de continuação para complementação do assunto que foi abordado estão elencadas abaixo:

- a) estudo numérico para o comportamento mecânico dos ensaios a flexão realizados nesta pesquisa;
- b) realização de corpos de prova com 3 camadas de têxtil para verificação do comportamento e comparação frente as realizadas nesta pesquisa;
- c) ensaios com diferentes distâncias da aplicação de carga em relação aos apoios, com intuito de verificação sobre as formações de fissuras, seguindo Kulas (2013).

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. F. S. B. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Citado na

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2018.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. p. 317. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BÜTTNER, T.; RAUPACH, M. **Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas-Bewehrungen in Beton - Materialauswahl und Lebensdauer-prognose**. Beton und Stahlbetonbau 108, p. 22-33, 2013

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese (Doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.

DALAZEN, C. D. A. **Reforço à flexão de vigas em concreto armado com a utilização de argamassa reforçada com têxteis de carbono e de vidro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

DENARDI, A. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. Dissertação — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FERRARA, Liberato; PARK, Yon Dong; SHAH, Surendra P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v.37, n. 6, p. 957-971, 2007.

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro alcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

GRIES, T.; ROYE, A.; OFFERMANN, P.; PELED, A. Textiles. In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC**. RILEM Publications SARL, 2006.

HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 30, p. 2050–2056, 7 2008. ISSN 01410296.

KULAS, C. H. **Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile**. Tese (Doutorado) — Lehrstuhl und Institut für Massivbau RWTH Aachen, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2006.

MORASSUTTI, D. S. **Passarela em concreto armado e concreto têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

OESTREICH, C. R. **Análise experimental de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

PELED, A.; MOBASHER, B.; BENTUR, A. **Textile Reinforced Concrete**. CRC Press, London, 2017.

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e concreto têxtil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

ROMANO, F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

RIZZO, J. **Comportamento mecânico do concreto têxtil submetido ao esforço de flexão: Um estudo experimental**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete—from the idea to a high performance material. In: **Proceedings of the FERRO-11—11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC—International Conference on Textile Reinforced Concrete, Aachen, Germany**. [S.l.: s.n.], 2015.

KULAS, C.; GMBH, S. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. In: GRCA CONGRESS, 2015.

VOSS, S. **Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilibewehrtem Beton**. Tese (Doutorado) — Lehrstuhl und Institut für Massivbau RWTH Aachen, 2008.

WITZKE, F. B. **Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento portland**. Tese (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

