

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

LETICIA MEURER

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL
REFORÇADOS COM TELAS EM FIBRA DE CARBONO

Joinville

2024

LETICIA MEURER

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL
REFORÇADOS COM TELAS EM FIBRA DE CARBONO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Coorientador: Eng. Vinícius Ramon Krause

Joinville

2024

LETICIA MEURER

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL
REFORÇADOS COM TELAS EM FIBRA DE CARBONO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 12 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Dr. Luciano Senff
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador/Presidente

Eng. Vinícius Ramon Krause
Universidade Federal de Santa Catarina
Coorientador

Msc. Julia da Rosa Martins
Universidade Federal de Santa Catarina
Membra

Dra. Anelize Borges Monteiro
Universidade Federal de Santa Catarina
Membra

Dr. Claudimir A. Carminatti
Universidade Federal de Santa Catarina
Membro

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora, por toda as bênçãos recebidas, concedendo-me sabedoria, calma e persistência nos momentos de dificuldade.

À minha família, meus pais Gilmar e Sueli, que não mediram esforços para me auxiliar por todo caminho, incentivando e apoiando em todos os passos. Aos meus irmãos e cunhados, por toda compreensão e auxílio para realização deste sonho. Obrigada por acreditarem em meu potencial.

Ao meu esposo e grande amor, Lucas, que esteve ao meu lado em toda a jornada. Agradeço pelas motivações, paciência, companheirismo e por sua valiosa contribuição nos diversos ensaios necessários para a realização desta pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Catarina, por permitir acesso à educação pública, gratuita e de qualidade. Em especial, a equipe de competição InfraTEC, pela oportunidade de participar e contribuir com o crescimento da equipe e o meu próprio desenvolvimento.

Ao meu orientador, Luciano Senff, e coorientador, Vinícius R. Krause, por todo suporte, dedicação e conhecimentos transmitidos ao longo dessa trajetória.

À Perville Construtora, pela oportunidade, estrutura cedida e materiais disponibilizados para realização deste projeto.

Aos meus amigos dentro e fora da universidade e aos colegas de profissão, pelos conhecimentos compartilhados, risadas, ensinamentos e momentos de descontração. A Maria Sagaz, pela ajuda no laboratório da UFSC.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste sonho, meu muito obrigada!

RESUMO

O concreto é amplamente reconhecido como o material de construção mais utilizado globalmente. Desta forma, melhorias contínuas são necessárias para otimizar suas propriedades e ampliar a durabilidade nas mais variadas aplicações, principalmente ao que se refere ao seu excelente desempenho à compressão, mas limitações quanto à resistência mecânica à tração. Dentro deste contexto, o concreto com fibra de carbono surge como uma alternativa às convencionais estruturas de concreto armado. Este trabalho apresenta uma pesquisa que investigou as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova de concretos autoadensáveis reforçados com telas em fibra de carbono de dimensões 22 x 22 x 1 mm e 27 x 27 x 0,5 mm. Um grupo desses corpos de prova tinham telas posicionadas a 1 cm da base e o outro grupo com a utilização de duas telas — uma posicionada a 1 cm da base e a outra a 1 cm do topo da estrutura —, com o objetivo de aprimorar a resistência mecânica à tração na flexão. A pesquisa inclui testes experimentais realizados em laboratório até 28 dias de cura, variando as características e posições das telas dentro da matriz de concreto. A análise dos dados foi validada por meio de metodologia estatística ANOVA, indicando que a inclusão de duas telas na mesma matriz de concreto não gerou impactos significativos no desempenho mecânico do material. Além disso, a adição das telas não resultou em melhorias expressivas na resistência à compressão. Por outro lado, verificou-se, especialmente no compósito com abertura de malha de 22 x 22 mm, um aumento médio de 227,53 % na resistência à tração na flexão, enquanto a tela com abertura de 27 x 27 mm demonstrou um percentual de 16,98 %.

Palavras-chave: concreto autoadensável; fibra de carbono; ANOVA; resistência mecânica.

ABSTRACT

Concrete is usually recognized as the most widely used construction material globally. Therefore, continuous improvements are necessary to optimize its properties and increase durability in the most varied applications, mainly with regard to its excellent compression performance, but limitations in terms of mechanical tensile strength. In this context, carbon fiber has emerged as an alternative to conventional reinforced concrete structures. This paper presents a study that investigated the physical and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with carbon fiber meshes measuring 22 x 22 x 1 mm and 27 x 27 x 0,5 mm. One group of these specimens had screens positioned 1 cm from the base and the other group used two screens - one positioned 1 cm from the base and the other 1 cm from the top of the structure - with the aim of improving the mechanical tensile strength in flexion. The research includes experimental tests carried out in the laboratory up to 28 days after curing, varying the characteristics and positions of the screens within the concrete matrix. Data analysis was validated using statistical methodology, indicating that the inclusion of two screens in the same concrete matrix had no significant impact on the material's mechanical performance. Furthermore, the addition of the meshes did not result in significant improvements in compressive strength. On the other side, the composite with the there was an average increase of 227,53 % in flexural tensile strength, especially in the composite with a mesh opening of 22 x 22 mm, while the mesh with an opening of 27 x 27 mm showed a percentage of 16,98 %.

Keywords: self-compacting concrete; carbon fiber; ANOVA; mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limites de composição do cimento Portland.	22
Figura 2 – Diagrama tensão x deformação das fibras de diferentes materiais.	25
Figura 3 – Tela em fibra de carbono.	25
Figura 4 – Metodologia de pesquisa.	27
Figura 5 – Ensaio químicos cimento CP V-ARI.	28
Figura 6 – Ensaio físicos cimento CP V-ARI.	28
Figura 7 – Agregados utilizados para produção do concreto: a) areia fina; b) areia industrial; c) brita 0.	30
Figura 8 – Agitador de peneiras para determinação da distribuição granulométrica.	31
Figura 9 – Telas de fibra de carbono utilizadas na pesquisa: a) HTC 21/21-80 b) HTC 25/25-80.	36
Figura 10 – Posicionamento das telas em fibra de carbono.	38
Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.	39
Figura 12 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos.	39
Figura 13 – Corpos de prova moldados.	40
Figura 14 – Conjunto utilizado para espalhamento do concreto.	41
Figura 15 – Corpos de prova para o ensaio de absorção de água.	43
Figura 16 – Prensa hidráulica utilizada para os ensaios mecânicos.	43
Figura 17 – Modelo para realização do ensaio de tração à flexão.	44
Figura 18 – Execução do ensaio de tração à flexão.	44
Figura 19 – Execução do ensaio de resistência à compressão.	45
Figura 20 - Espalhamento do CAA.	52
Figura 21 – Classificação do CAA de acordo com sua utilização.	53
Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova de referência.	62
Figura 23 – Rompimento dos corpos de prova reforçados com tela.	63
Figura 24 – Posicionamento das telas de carbono em relação a matriz de concreto.	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.	48
Gráfico 2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.	49
Gráfico 3 – Porosidade aparente: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.....	54
Gráfico 4 – Porosidade aparente em relação aos compósitos.	54
Gráfico 5 – Absorção de água: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.....	56
Gráfico 6 – Absorção de água em relação aos compósitos.	56
Gráfico 7 – Densidade aparente: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.....	57
Gráfico 8 – Densidade aparente em relação aos compósitos.	57
Gráfico 9 – Resistência a compressão para o traço de referência do concreto autoadensável aos 7 e 28 dias de cura.	59
Gráfico 10 – Resistência à tração na flexão: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.....	60
Gráfico 11 – Variação de resistência a tração na flexão do concreto com adição de tela em fibra de carbono aos 28 dias de cura.....	61
Gráfico 13 – Resistência a compressão: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.....	64
Gráfico 14 – Variação de resistência à compressão do concreto com adição de tela em fibra de carbono aos 28 dias de cura.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de qualidade CQ Flow 8406.....	29
Tabela 2 – Propriedades tela HTC 21/21-80.....	36
Tabela 3 – Propriedades tela HTC 25/25-80.....	36
Tabela 4 – Traço do concreto de referência.....	37
Tabela 5 – Corpos de prova produzidas com diferentes posições de telas em carbono.	38
Tabela 6 – Classe de espalhamento do CAA.....	41
Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo.	49
Tabela 8 – Módulo de finura agregado miúdo.....	50
Tabela 9 – Massa específica agregado graúdo.....	50
Tabela 10 – Massa específica dos agregados miúdos (g/cm ³).	51
Tabela 11 – Resultado da massa unitária dos agregados (g/cm ³).	51
Tabela 12 – Análise da variância da porosidade aparente.....	55
Tabela 13 – Média pareada da porosidade aparente.....	55
Tabela 14 – Análise da variância da absorção.....	56
Tabela 15 – Média pareada da absorção.....	56
Tabela 16 – Análise da variância da densidade aparente.....	58
Tabela 17 – Média pareada da densidade aparente.....	58
Tabela 18 – Análise da variância da resistência a tração na flexão.....	60
Tabela 19 – Média pareada de resistência a flexão.....	62
Tabela 20 – Análise da variância da resistência a compressão.....	64
Tabela 21 – Média pareada de resistência a compressão.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA – Concreto Autoadensável

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico

LablCons – Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

PAN – Poliacrilonitrila

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
ρ	Densidade
g	Gramas
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
h	Hora
kg	Quilograma
MPa	Mega Pascal
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
min	Minuto
tf	Tonelada força

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.2. CONCRETO	18
2.2.1. Agregados	19
<u>2.2.1.1 Agregados miúdos</u>	<u>19</u>
<u>2.2.1.2 Agregados graúdos</u>	<u>20</u>
2.2.2 Cimento	21
2.2.3 Concreto autoadensável	22
2.2.4 Concreto armado	23
2.2.5 Fibras de carbono	24
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	27
3.1. MATERIAIS	28
3.1.1 Cimento	28
3.1.2 Água	29
3.1.3 Aditivo superplastificante	29
3.1.4 Agregados	29
<u>3.1.4.1 Granulometria</u>	<u>30</u>
<u>3.1.4.2 Massa específica do agregado miúdo</u>	<u>31</u>
<u>3.1.4.3 Massa específica do agregado graúdo</u>	<u>33</u>
<u>3.1.4.4 Massa unitária</u>	<u>35</u>
3.1.5 Fibra de carbono	35
3.2 DOSAGEM DO CONCRETO	37
3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO ..	40
3.3.1 Espalhamento	41
3.3.2 Absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente	42
3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA	43
3.4.1 Resistência à tração na flexão	43

3.4.2 Resistência à compressão	45
3.5 ANALISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	46
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	48
4.1.1 Distribuição granulométrica dos agregados	48
4.1.2 Massa específica e massa unitária dos agregados.....	50
4.2 DOSAGEM DO CONCRETO	51
4.2.1 Ensaio de espalhamento	52
4.2.2 Ensaio de porosidade aberta	53
4.2.3 Ensaio de absorção de água	56
4.2.4 Ensaio de densidade aparente.....	56
4.2.5 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos.....	58
4.2.6 Ensaio de resistência a tração na flexão.....	59
4.2.7 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos...	64
5. CONCLUSÃO	67
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é amplamente utilizado no Brasil, sendo presente desde a construção de residências até grandes edifícios. Esse sistema construtivo passou por um processo contínuo de evolução desde o século XIX até o presente. Atualmente, compreende-se que não se trata de dois materiais distintos, aço e concreto, mas sim de um compósito com características distintas daqueles que os originam (Freitas, 2019), sendo o compósito mais conhecido na contemporaneidade (Bernardi, 2003).

Devido à sua versatilidade, durabilidade e capacidade de suportar grandes cargas, o concreto é o material mais utilizado dentro da construção civil. Dessa forma, melhorias contínuas são necessárias para otimizar suas propriedades. Dentro desse contexto, o concreto autoadensável se destaca como uma alternativa promissora, sendo capaz ser produzido em ambiente controlado e apresentar simultaneamente fluidez sob seu próprio peso, habilidade passante e resistência à segregação (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15823-1: 2017).

À medida que a demanda por estruturas mais leves, duráveis e sustentáveis aumenta, são exploradas alternativas para melhorar as propriedades do concreto. Assim, a incorporação de telas em fibra de carbono como reforço no concreto autoadensável visa aprimorar sua resistência mecânica à flexão e resultar em um material mais eficiente e com maior vida útil. A fibra de carbono é conhecida por suas excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência à tração, baixa densidade e resistência à corrosão, o que a torna uma alternativa atrativa para o reforço de estruturas em concreto armado (Beber, 2003).

Na contemporaneidade, não há no Brasil normas regulamentadoras que abordem telas de fibra de carbono aplicadas à construção civil. Nessa perspectiva, apresenta-se neste trabalho uma pesquisa que analisou e discutiu a viabilidade, os benefícios e as limitações do uso de concreto autoadensável reforçado com tela em fibra de carbono. São abordados, também, os aspectos técnicos relacionados à dosagem e propriedades físicas e mecânicas, abrangendo a análise de dois diferentes tipos de telas e o comparativo entre as mesmas e seus posicionamentos na matriz de concreto.

Como resultado geral pode-se confirmar a viabilidade para aplicação de telas de fibras de carbono em vigas de concreto autoadensável, com base nas resistências

a compressão e à tração na flexão aos 28 dias de cura do compósito. No âmbito da pesquisa, será adotada a metodologia estatística ANOVA para investigar os erros associados ao método experimental e validação de resultados.

1.1. OBJETIVOS

Com o intuito de investigar a aplicabilidade das telas em fibras de carbono em estruturas de concreto, propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a influência da incorporação de telas de fibras de carbono na resistência à flexão de concreto autoadensável.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar quatro diferentes arranjos de telas em fibras de carbono na matriz do concreto, buscando otimizar o desempenho mecânico após 28 dias de cura;
- Examinar os valores de resistência mecânica obtidos por meio dos ensaios de tração na flexão e compressão, visando atingir o melhor aproveitamento do material;
- Investigar as propriedades físicas do concreto com a adesão de telas em fibra de carbono com aberturas da malha de 22 x 22 x 1 mm e 27 x 27 x 0,5 mm na matriz do concreto, aos 28 dias de cura;
- Validar resultados a partir da metodologia estatística (ANOVA).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para analisar e discutir a viabilidade da aplicação de telas de fibras de carbono em placas de concreto autoadensável com base em ensaios mecânicos, é necessário compreender as principais discussões teóricas acerca dos materiais compósitos, identificando as pesquisas relevantes ao reforço estrutural utilizando fibras de carbono em concreto. Apresenta-se, portanto, neste capítulo o conceito de materiais compósitos e concreto armado.

2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

A combinação de materiais para produzir um único composto com propriedades aprimoradas às dos constituintes isolados é o principal objetivo dos compósitos. Geralmente, os compósitos são formados apenas por dois componentes: a matriz e o composto disperso, diretamente envolvido pela matriz (Beber, 2003). Essa combinação é determinada tanto em função da aplicação específica que o material se propõe a atender tanto em geometria quanto de suas propriedades mecânicas, e sua relativa importância, considerada em aspectos como resistência à corrosão, rigidez, comportamento acústico, entre outros (Moreira, 2008).

Segundo Moreira (2008), os materiais compósitos de matriz polimérica surgiram em meados do século XX, e combinam fibras resistentes e rígidas (de vidro, carbono e aramida) com uma matriz plástica adesiva macia e relativamente dúctil (que pode ser poliéster ou epóxi). A concepção destes tipos de materiais é milenar, existindo referências sobre argila reforçada com palha em tijolos no antigo Egito. A partir de 1960, desenvolveram-se fibras de carbono que foram a partir de 1968 aplicadas em aviões.

Vasconcelos (1994) *apud* Gabardo (2019) menciona que, ao observar a natureza, nota-se que, no contexto de fibras, os fios extremamente finos alcançam resistências altas, e que o aumento da resistência nesses casos passa a ser não linear. Esta afirmação encontra-se baseada na teoria dos defeitos, já que os fios finos apresentam menor porcentagem de defeitos, ocorrência natural em seções maiores, destacando-se a utilidade das fibras como material de reforço (Bernardi, 2003). Dentre os materiais compósitos mais familiares da atualidade, tem-se o concreto.

2.2. CONCRETO

Na área da construção civil, as matrizes mais empregadas são aquelas que se rompem sem deformação plástica expressiva, ou seja, aqueles que sofrem deformações sem afetar diretamente sua estrutura, como pastas de cimentos, concretos e aglomerantes naturais e argamassas (Fortes, 2000).

O concreto é um material resultante da combinação de um meio cimentante com aglomerantes, agregados miúdos e graúdos, água e, frequentemente, aditivos. Segundo Fortes (2000), essa mistura pode ser elaborada com diferentes tipos de cimento e pode incluir materiais pozolânicos, como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa, além de adições minerais, polímeros e fibras. Essa diversidade de componentes permite a adaptação do concreto para atender a variados requisitos de desempenho e durabilidade.

No contexto dos materiais em estado sólido e suas aplicações, é essencial compreender suas características relacionadas à continuidade, homogeneidade e isotropia, levando em perspectiva que a interpretação do material é influenciada pela escala de observação, como afirma Isaia *et al.* (2017). Embora o concreto possa ser considerado uniforme em diversas análises, internamente ele se apresenta como um material multifásico, onde cada fase possui características específicas. Conforme destaca Metha e Monteiro (2014), o concreto é constituído por três fases distintas: os agregados, uma matriz porosa que os envolve, e uma região de transição que conecta as duas primeiras fases.

De acordo com Neville e Brooks (2013), um bom concreto é aquele que atende a critérios específicos tanto em seu estado fresco quanto endurecido. No estado fresco, o concreto deve apresentar uma consistência que permita seu adensamento, além de ser coeso o suficiente para evitar a segregação durante o lançamento. No estado endurecido, o concreto deve demonstrar resistência adequada à compressão.

Conforme expõe Lorenzetti (2002), a resistência à compressão do concreto está intimamente relacionada à qualidade da pasta de cimento hidratada, sendo influenciada por propriedades que dependem dos aspectos da microestrutura. Nesse contexto, a densidade do agregado revela-se um fator determinante para a resistência à compressão do concreto, uma vez que agregados de menor densidade tendem a apresentar maior porosidade, o que resulta em uma diminuição da resistência e, conseqüentemente, em uma mistura menos robusta (Metha e Monteiro, 1994). Nos

próximos tópicos, serão discutidos os materiais empregados na elaboração do concreto e, posteriormente, composições realizadas a partir do mesmo.

2.2.1. Agregados

Um agregado pode ser definido como um material particulado e com atividade química praticamente nula. Esse termo é utilizado de maneira genérica para referir-se a materiais compostos por misturas de partículas com tamanhos variados, como, por exemplo, filler, bica corrida, rachão, areias e brita (Holsbach, 2004).

Para Holsbach (2004), os agregados desempenham um papel crucial, influenciando positivamente a retração e a resistência ao desgaste por abrasão em argamassas e concretos. Além disso, não comprometem a resistência mecânica dos materiais, uma vez que agregados de boa qualidade apresentam resistência superior à da pasta de aglomerantes, contribuindo assim para a durabilidade e estabilidade das estruturas.

Definidos a partir da ABNT NBR 7211:2022, os agregados são originados da britagem de rochas, e o processo de beneficiamento resulta em uma distribuição granulométrica composta por agregados miúdos e graúdos. Essa distribuição permite o ajuste da curva granulométrica, levando em consideração as características específicas do agregado e do concreto a ser produzido com esse material (Neville, 2016).

2.2.1.1 Agregados miúdos

Estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2022, agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 μm . Eles são definidos como materiais granulares, sem forma e volume definidos, geralmente inertes, com dimensões, características e propriedades adequadas ao uso da engenharia civil (Holsbach, 2004).

Conforme afirmado por Fabro *et al.* (2011), os agregados miúdos utilizados na produção de concretos podem ser classificados em naturais e artificiais. As areias naturais, provenientes dos leitos dos rios geralmente apresentam grãos mais arredondados. Já as areias artificiais, originadas da britagem de rochas, tendem a ter grãos mais angulosos. O teor de partículas finas nesses agregados pode influenciar

diretamente a quantidade de água necessária para a formulação do concreto (Mehta e Monteiro, 1994).

A porosidade, a massa específica, a granulometria, a forma e a textura superficial dos agregados são fatores determinantes para as propriedades do concreto no estado fresco. Partículas angulosas tendem a ser benéficas, pois proporcionam uma adesão superior entre as partículas individuais, resultando em um aumento da resistência mecânica do concreto. No entanto, essas partículas apresentam maior área superficial, o que exige uma quantidade maior de água para atingir a mesma consistência na argamassa ou concreto, o que pode comprometer a resistência à compressão (Farias; Palmeira, 2007).

A relação entre partículas finas e o total de partículas na mistura de concreto influencia seu comportamento reológico, como observado por Fabro *et al* (2011), *apud* Larrard (1999). O mesmo autor destaca que, com o aumento da porcentagem de finos, o volume de vazios tende a diminuir. No entanto, ao atingir certo nível, esses finos tendem a dificultar a acomodação de grãos maiores e gerar afastamento entre partículas, o que pode elevar o índice de vazios e prejudicar o empacotamento dos grãos. O empacotamento granular, aliado às interações das partículas, contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto (Rodolpho, 2007).

A areia industrial, também conhecida como areia artificial, é um material obtido a partir da extração de rochas, que passam por um processo de britagem até atingir granulometria inferior a 4,8 mm, visando à obtenção de maior uniformidade para seu aproveitamento, possuindo uma distribuição homogênea dos grãos (Costa, 2005). Segundo Carvalho e Freitas (2017), a areia industrial apresenta um elevado teor pulverulento, o que facilita o preenchimento dos vazios da pasta de cimento. Contudo, quando esse índice ultrapassa determinado limite, há a necessidade de um maior volume de água, o que pode reduzir a resistência do concreto.

2.2.1.2 Agregados graúdos

Em conformidade com o que estabelecem Cavalcanti e Parahyba (2012), os materiais rochosos e agregados graúdos em geral, requerem o conhecimento prévio de suas propriedades e devem passar por caracterização tecnológica antes da sua utilização na construção civil, tendo por principais objetivos contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, reduzir as variações de volume e

contribuir para a redução do custo do concreto. A padronização desses procedimentos que regulam a qualidade da brita está definida nas normas da ABNT.

Os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm são denominados como agregados graúdos (ABNT 7211: 2022). A construção civil utiliza a rocha como agregado graúdo para diversas finalidades e em suas diversas composições e formas, variando suas características de acordo com as especificações requeridas para concretos, lastros e calçamentos, bases e pavimentos (Cavalcanti; Parahyba, 2012).

A brita zero é gerada por meio do processo de rebitagem e sua consistência granulométrica é garantida pela etapa de peneiramento. Suas principais utilizações incluem a produção de estruturas pré-moldadas, a confecção de concreto, a elaboração de misturas asfálticas, bem como a pavimentação de pátios e estacionamentos (Rudnick Minérios, 2024).

2.2.2 Cimento

A utilização de materiais cimentícios remete a épocas antigas. O primeiro concreto registrado na história foi utilizado por gregos e romanos, que combinavam areia e pedra fragmentada com calcário e água. Para construções submersas e contenções, essas civilizações moíam cal em conjunto com cinza vulcânica, resultando no que hoje conhecemos como cimento pozolânico (Neville; Brooks, 2013).

O comportamento de cada tipo de concreto deve levar em conta o comportamento individual de cada tipo de cimento utilizado, principalmente no que concerne à resistência mecânica, à consistência, à exsudação de água e, não menos importante, à economia (Pitta, 1998). Na Figura 1 apresentam-se os tipos de cimento disponíveis no mercado e suas composições limites, conforme estabelecido pela ABNT NBR 16697:2018.

Figura 1 – Limites de composição do cimento Portland.

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Cimento Portland comum		CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5			
		CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10	
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15	
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15	
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25	
Cimento Portland de alto forno		CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10	
Cimento Portland pozolânico		CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10	
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V ^a			ARI	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40	75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural				–	–	50 – 74	–	–

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

De acordo com a ABNT NBR 16697:2018, o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) é capaz de atingir uma resistência à compressão igual ou superior a 14 MPa em 24 h após concretagem. Essa característica torna o CP V-ARI amplamente utilizado na indústria de pré-fabricados, pois permite uma aceleração no processo de movimentação das peças se comparado a outros tipos de cimento. Esse tipo de cimento foi escolhido neste trabalho, devido às suas vantagens operacionais e de desempenho.

2.2.3 Concreto autoadensável

A ABNT NBR 15823-1:2017 define o concreto autoadensável como um material capaz de apresentar simultaneamente três propriedades: fluidez sob seu próprio peso, habilidade passante para que a mistura escoe de forma íntegra, e resistência à segregação durante as etapas de mistura, transporte e lançamento. A fluidez é a propriedade que permite ao concreto autoadensável (CAA) fluir dentro da forma sem a formação de vazios durante o processo de concretagem. A habilidade passante refere-se à capacidade da mistura de manter a coesão necessária para

escoar através da forma, atravessando as armaduras sem obstruções no fluxo. Por fim, a resistência à segregação é a propriedade que assegura a homogeneidade do material, independentemente da presença de obstáculos durante seu escoamento (Tutikian; Molin, 2008).

Desde 1983, a durabilidade do concreto tornou-se uma questão central no campo da engenharia civil no Japão. Este tema ganhou destaque em virtude das crescentes demandas por estruturas que não apenas apresentem um desempenho imediato, mas que também mantenham suas propriedades ao longo do tempo, resistindo a condições ambientais adversas (Okamura; Ouchi, 2003).

O conceito de concreto autoadensável foi proposto por Okamura em 1986, marcando um ponto de inflexão nos estudos sobre a trabalhabilidade do concreto. Os estudos fundamentais sobre este tipo de concreto foram realizados por Maekawa e Ozawa na Universidade de Tóquio. A pesquisa, documentada em publicações de Maekawa (1999), Ozawa (1989) e Okamura (1993), aprofundou-se nas propriedades físicas e mecânicas do CAA, estabelecendo uma base teórica sólida que sustenta sua aplicação prática.

De acordo com Repette *et al.* (2011), o CAA é produzido a partir da mesma combinação de materiais utilizada na fabricação do concreto convencional. No entanto, é necessária a adição de aditivos superplastificantes de alta eficiência, além de um maior volume de partículas finas complementares ao meio cimentante, os quais conferem propriedades reológicas de baixa tensão de escoamento e viscosidade plástica. Simonetti (2008) complementa afirmando que os finos auxiliam as partículas de cimento a reagir rapidamente com a água, ocasionando ganhos de resistência nas primeiras idades de cura, e os superplastificantes atuam na dispersão das partículas de cimento floculadas, através da repulsão eletrostática.

2.2.4 Concreto armado

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, sem que sejam aplicados alongamentos iniciais das armaduras antes da consolidação dessa aderência. Conforme afirmam Neville e Brooks (2013), os dois materiais mais utilizados estruturalmente são o concreto e o aço, os quais podem ser complementares ou aplicados individualmente.

O concreto teve início após a patente do cimento Portland em 1824, na Inglaterra, destacando-se para construção e inauguração da primeira ponte em argamassa armada, no Castelo de Chazelet, em 1875. Em 1886 o engenheiro alemão Gustav Adolf Wayss desenvolveu o uso do concreto armado e em 1878, na Califórnia, foi construído o primeiro edifício com essa técnica (Helene; Andrade, 2010).

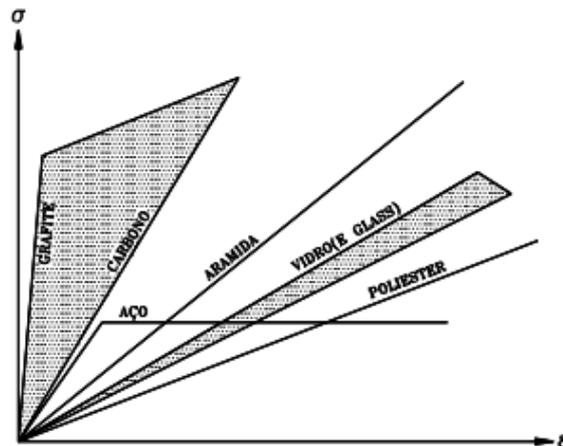
Embora o concreto possua excelente resistência à compressão, sua resistência à tração é limitada. Dessa forma, é necessário combiná-lo com materiais que possuam boas propriedades quando se exige resistência a esse tipo de esforço. Nesse contexto, de acordo com Porto e Fernandes (2015), surgem as soluções em concreto armado e protendido. Dentre as vantagens do concreto armado, destacam-se a facilidade de execução e a viabilidade para a construção de estruturas monolíticas e hiperestáticas. Por outro lado, entre as desvantagens, têm-se o baixo desempenho em termos de proteção térmica, o limitado isolamento acústico e o elevado peso próprio.

2.2.5 Fibras de carbono

Segundo Lebrão (2008), em 1950 a primeira fibra de carbono contínua foi produzida comercialmente, a partir da carbonização de rayon sintético (composto orgânico a partir da celulose) para aplicações em mísseis de temperaturas elevadas. Entretanto, devido ao baixo rendimento de carbono e baixas propriedades mecânicas, sua utilização foi inviável. Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras de carbono utilizando-se um polímero sintético obtido a partir da polimerização de nitrila de acrílico (poliacrilonitrila – PAN).

Conforme Machado (2006), o processo de produção consiste na oxidação das fibras precursoras seguido do processamento a elevadas temperaturas (variando de 1.000 °C a 1.500 °C). Nesse processo, as fibras resultantes apresentam átomos de carbono perfeitamente alinhados, característica que confere elevada resistência mecânica ao produto final. Na Figura 2 apresenta-se a relação tensão x deformação resultante do ensaio à tração de alguns materiais, constatando um melhor comportamento das fibras de carbono em relação às de vidro e aramida.

Figura 2 – Diagrama tensão x deformação das fibras de diferentes materiais.

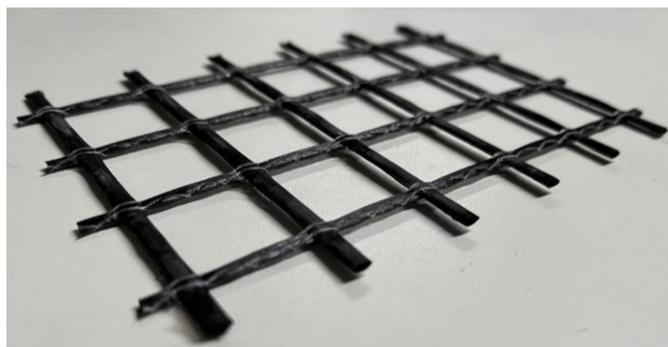


Fonte: Machado (2006, p. 6).

De acordo com Silva (2017), as fibras de carbono são mais utilizadas para reforço de estruturas em concreto armado. Além disso, esse material proporciona melhor resistência a ataques químicos, é resistente à corrosão, não absorve água, possui alta resistência à fadiga e rigidez, resistência térmica, estabilidade dimensional, baixa massa específica, elevado módulo de elasticidade e pode exceder os metais em resistência à tração (Callister, 1997 apud Lebrão, 2008).

A fibra de carbono é um material de grande potencial, cuja eficácia está relacionada à força das ligações carbono-carbono e à leveza inerente ao átomo de carbono (Taylor, 1994 apud Beber, 2003). Destaca-se, ainda, que as propriedades mecânicas da fibra, como o elevado módulo de elasticidade e a alta resistência, estão diretamente ligadas ao grau de orientação das fibras, isto é, ao paralelismo entre os eixos das mesmas (Beber, 2003). A Figura 3 apresenta a tela em fibra de carbono utilizada na pesquisa apresentada neste trabalho.

Figura 3 – Tela em fibra de carbono.



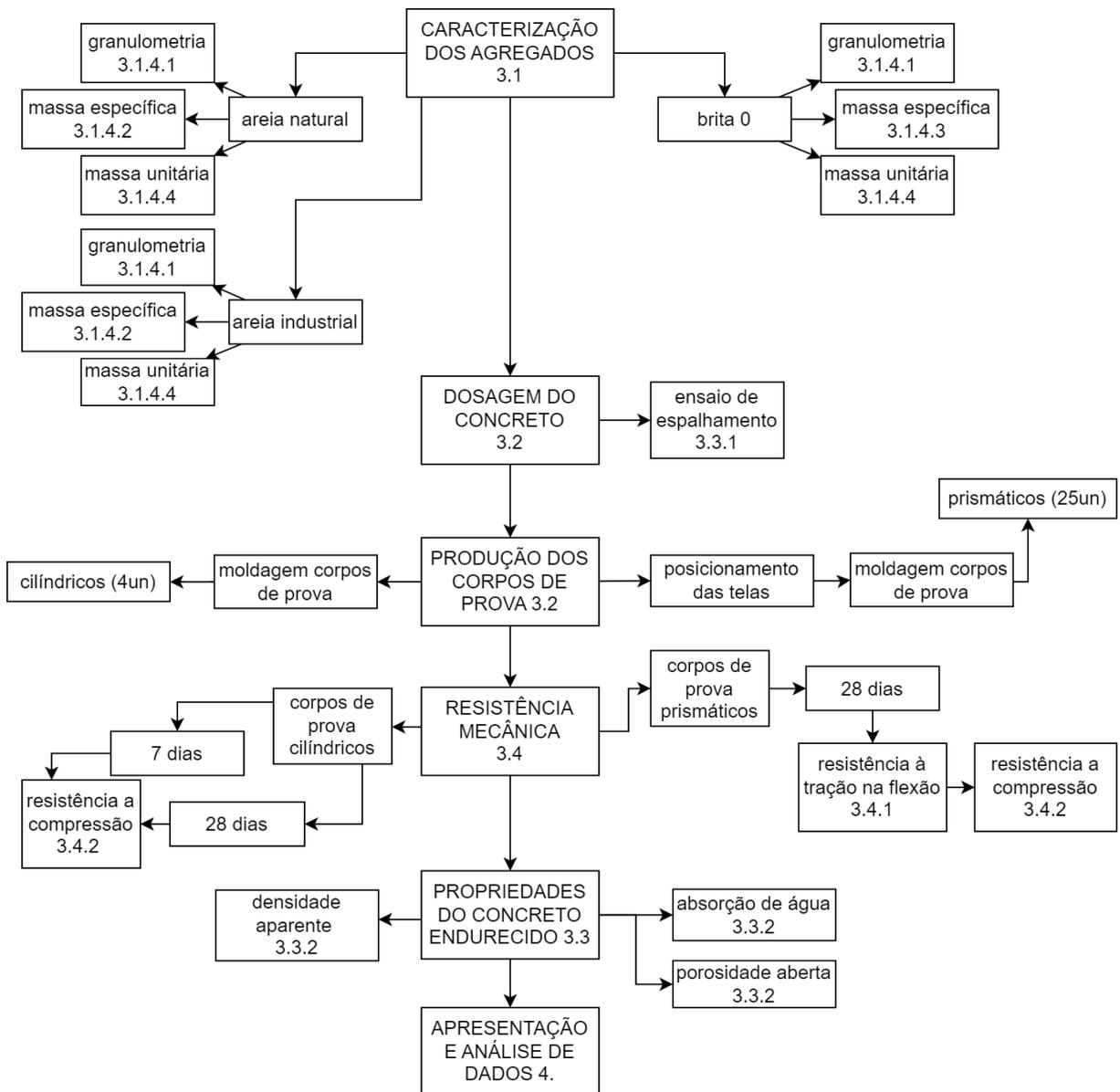
Fonte: Autora (2024).

Assim como destaca Cabral (2018), ao contrário do aço, os reforços não metálicos, como as malhas de carbono, representam uma excelente alternativa ao concreto armado convencional. Esses materiais não sofrem corrosão, o que diminui a necessidade de cobrimento da armadura e possibilita a fabricação de elementos estruturais mais esbeltos. Ainda conforme o autor, o desempenho mecânico destes materiais está diretamente relacionado às propriedades dos seus componentes e ao processo de fabricação.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos utilizados nos ensaios para o desenvolvimento da pesquisa. Foi adotada a metodologia experimental, organizada conforme o fluxograma apresentado na Figura 4, que ilustra as etapas do experimento e sua localização no presente texto.

Figura 4 – Metodologia de pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

3.1. MATERIAIS

Os materiais e o traço utilizados para a confecção do concreto autoadensável são fornecidos pela empresa Perville Construtora. O traço usual adotado é composto por agregados graúdos do tipo brita 0, os agregados miúdos utilizados são areia natural e areia do tipo industrial. O cimento empregado é o CP V ARI, proporcionando alta resistência ao concreto, em poucos dias de cura. Também se utilizou o aditivo CQ-Flow 8406, visando reduzir o excesso de água, conferindo melhor trabalhabilidade sem alterar o tempo de cura.

3.1.1 Cimento

Para produção do concreto autoadensável utilizou-se o cimento CP V-ARI produzido pela empresa Itambé. Segundo a empresa, a massa específica desse aglomerante é de 3,06 g/cm³. O ensaio de qualidade do cimento é do ano de 2023, sendo que os resultados químicos podem ser observados na Figura 5, e os físicos na Figura 6.

Figura 5 – Ensaio químicos cimento CP V-ARI.

Data	Químicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,45	18,57	2,96	61,70	3,25	2,76	3,57	1,71	0,86	0,71
Sd	0,06	0,13	0,10	0,56	0,36	0,06	0,08	0,10	0,04	0,05
Min	4,35	18,33	2,82	60,30	2,60	2,62	3,44	1,54	0,77	0,66
Max	4,53	18,73	3,16	62,30	3,93	2,84	3,70	1,82	0,96	0,85

Fonte: Itambé (2023).

Figura 6 – Ensaio físicos cimento CP V-ARI.

Exp. Quente	Físicos									
	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
0,18	166	217	28,7	4.311	0,12	0,72	26,4	38,9	44,6	51,8
0,12	10	8	0,3	44,01	0,04	0,25	0,8	0,9	0,9	2,7
0,00	154	206	28,3	4.260	0,05	0,31	25,6	37,5	42,8	43,8
0,39	180	230	29,2	4.376	0,20	1,11	28,4	40,5	46,2	54,5

Fonte: Itambé (2023).

Com adição de até 10% de filler calcário e alto grau de finura em sua composição, o CP V-ARI apresenta bom desempenho em um baixo período de cura,

proporcionando maior rendimento ao concreto (Itambé, 2023). A obtenção dessa propriedade é feita por meio de uma dosagem específica de calcário e argila na fabricação do clínquer, além de uma moagem mais fina do cimento (IBRACON, 2009).

3.1.2 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição pública do município de Joinville, Santa Catarina.

3.1.3 Aditivo superplastificante

Para esta pesquisa utilizou-se do concreto autoadensável (CAA) composto por 0,15% de aditivos superplastificantes de terceira geração a base de policarboxilato, totalmente isento de cloretos (Camargo Química, 2023). A Tabela 1 apresenta o certificado de análise do aditivo utilizado nas misturas.

Tabela 1 – Dados de qualidade CQ Flow 8406.

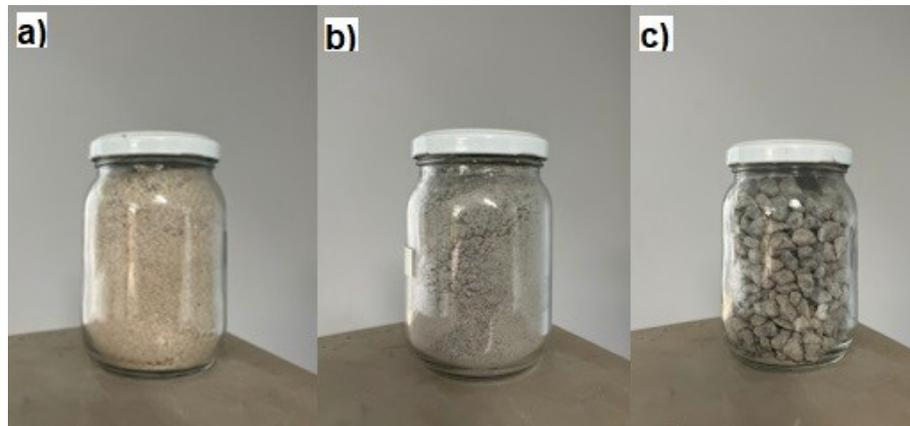
Parâmetro	Unidade	Especificação	Resultado
pH puro	-	4,0 - 6,0	4,88
Densidade	g/cm ³	1,065 - 1,085	4,075
Cor	-	Amarelo	Amarelo

Fonte: Adaptado Camargo Química (2023).

3.1.4 Agregados

Utilizou-se areia natural e areia industrial como agregados miúdos e brita 0 como agregado graúdo, observados respectivamente na Figura 7. Para caracterização destes agregados foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabICons), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e também no Laboratório da Perville Construtora.

Figura 7 – Agregados utilizados para produção do concreto: a) areia fina; b) areia industrial; c) brita 0.



Fonte: Autora (2024).

3.1.4.1 Granulometria

A distribuição granulométrica é o estudo que analisa a variação das dimensões dos grãos, sendo realizada por meio de um ensaio regulamentado pela ABNT NBR 17054:2022. Essa norma define os equipamentos necessários e estabelece a metodologia a ser seguida para garantir a precisão na aferição dos resultados.

Para a realização deste ensaio, foram separadas duas amostras de cada material: areia fina, areia industrial e brita 0. Estes materiais foram submetidos a secagem na estufa por um período de 24 horas a uma temperatura de 105 ± 5 °C. Após o processo de secagem, duas amostras de 1.500 g de cada material foram retiradas. Em seguida, foram agitadas por um período de 5 minutos em agitador mecânico de peneiras, apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Agitador de peneiras para determinação da distribuição granulométrica.



Fonte: Autora (2024).

Concluída a agitação, todas as peneiras utilizadas passaram por pesagem individual, e a curva de distribuição granulométrica é traçada com base na média aritmética do peso retido em cada uma das peneiras. As peneiras utilizadas para o ensaio do agregado miúdo foram dispostas na ordem de 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm, 600 μm ; 300 μm ; 150 μm ; 75 μm , enquanto que as peneiras para o ensaio de agregado graúdo foram são dispostas na ordem de 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm, 2,36 mm; 1,18 mm; 600 μm , cada um formando um único conjunto acompanhado de tampa e fundo.

Estabelecido a partir da ABNT NBR 17054:2022, a dimensão máxima característica dos agregados, corresponde à abertura nominal da peneira a qual o mesmo apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% de sua massa total. O módulo de finura é baseado na soma das massas retidas acumuladas nas peneiras. Esses parâmetros são importantes para caracterizar as propriedades dos materiais estudados.

3.1.4.2 Massa específica do agregado miúdo

A determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo pode ser obtida a partir da ABNT NBR NM 52:2003. Inicialmente,

procedeu-se com a pesagem de 2 kg de areia fina e 2 kg de areia industrial, cada uma alocada em recipientes distintos. Para a execução do ensaio, ambas as amostras foram imersas em água por um período de 24 horas (h). Após esse intervalo, a água superficial foi removida, e as amostras foram submetidas a secagem em temperatura ambiente, até alcançarem a condição saturada superfície seca.

Após o processo de secagem, 500 g de material foram colocados no picnômetro e a massa do conjunto foi aferida. Posteriormente, o frasco foi preenchido com água até a marca dos 500 ml e foi agitado, a fim de eliminar as bolhas de ar, sendo mais tarde o conjunto pesado novamente. Em seguida, o conjunto foi mantido em repouso por aproximadamente 1 h, o mesmo foi completado com água até a marca de 500 ml e novamente pesado. O agregado foi então removido do frasco e colocado na estufa por 24 h a uma temperatura de 105 ± 5 °C. Após o resfriamento à temperatura ambiente, determinou-se a massa do agregado. Esse procedimento foi repetido para duas amostras de ambos os tipos de agregados miúdos.

A massa específica aparente do agregado miúdo seco pode ser determinada a partir da Equação 1.

$$d1 = \frac{m}{V - Va} \quad (01)$$

$d1$ é a massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m é a massa da amostra seca na estufa (g);

V é o volume do frasco (cm^3);

Va é o volume de água adicionado ao frasco (cm^3), que deve ser calculado a partir da Equação 2.

$$Va = \frac{m2 - m1}{\rho a} \quad (02)$$

$m1$ é a massa do conjunto (frasco + agregado);

$m2$ é a massa total (frasco + agregado + água);

ρa é a massa específica da água (cm^3).

A massa específica saturada da superfície seca do agregado miúdo pode ser calculada com base na Equação 3.

$$d2 = \frac{ms}{V - Va} \quad (03)$$

$d2$ é a massa específica saturado superfície seca do agregado (g/cm^3);

ms é a massa da amostra saturada superfície seca (g);

V é o volume do frasco (cm^3);

Va é o volume de água adicionado ao frasco (cm^3).

A massa específica do agregado pode ser determinada com base nos resultados obtidos a partir das equações expressas anteriormente, aplicando-os na Equação 4.

$$d3 = \frac{m}{(V - Va) - \frac{ms - m}{\rho a}} \quad (04)$$

$d3$ é a massa específica do agregado (g/cm^3);

m é a massa da amostra seca na estufa (g);

ms é a massa da amostra saturada superfície seca (g);

ρa é a massa específica da água (cm^3);

V é o volume do frasco (cm^3);

Va é o volume de água adicionado ao frasco (cm^3).

3.1.4.3 Massa específica do agregado graúdo

A ABNT NBR NM 53:2009 define a massa específica, massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo. Inicialmente pesou-se 2 kg de brita 0 para realização do ensaio, sendo a amostra então imersa em água a uma temperatura de 23 ± 2 °C por 24 h. Posteriormente, a amostra foi retirada da água e envolvida em um pano absorvente até que todo o excesso de água fosse removido. Ao pesá-la foi obtido o valor de agregado saturado à superfície seca. Continuando o procedimento, a amostra foi colocada em um cesto metálico e suspensa por uma balança de precisão em um tanque com água. Dessa forma, sendo determinada a massa em água da amostra.

A etapa final do processo é a secagem da amostra em estufa a 105 ± 5 °C, por 24 h para assim, ser obtido o valor de massa seca do agregado. A massa

específica aparente do agregado na condição saturado superfície seca, pode ser determinada a partir da Equação 5.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (05)$$

d_s é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s é a massa ao ar da amostra saturada superfície seca (g);

m_a é a massa em água da amostra (g).

Para cálculo da massa específica do agregado na condição seca, deve ser utilizada a Equação 6.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (06)$$

d é a massa específica do agregado na condição seca (g/cm^3);

m é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_a é a massa em água da amostra (g).

A obtenção da massa específica aparente do agregado graúdo deve ocorrer a partir da Equação 7.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (07)$$

d_a é a massa específica aparente do agregado na condição seca (g/cm^3);

m é a massa ao ar da amostra seca (g);

m_a é a massa em água da amostra (g);

m_s é a massa ao ar da amostra saturada superfície seca (g).

O resultado da absorção de água para o agregado graúdo pode ser definido com base na Equação 8.

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 \quad (08)$$

A é a absorção de água (%);

m_s é a massa ao ar da amostra em condição saturada superfície seca (g);

m é a massa ao ar da amostra seca (g).

3.1.4.4 Massa unitária

A massa unitária dos agregados constitui uma medida indireta da quantidade de vazios presentes entre os grãos, sendo expressa pela relação entre a massa do agregado e o volume do recipiente que o contém. A ABNT NBR 16972:2021 estabelece o método de ensaio para determinação deste parâmetro, as instruções estabelecidas na norma foram seguidas para a aferição da massa unitária tanto dos agregados miúdos quanto do graúdo.

Para iniciar o procedimento, utilizou-se um cilindro de massa e volume conhecidos, o mesmo foi preenchido com o respectivo material até atingir seu transbordo, sem a realização de nenhum tipo de compactação. Dessa forma, a massa unitária pode ser definida pela Equação 9.

$$Mu = \frac{Mar - Mr}{V} \quad (09)$$

Mu é a massa unitária do agregado (kg/m^3);

Mar é a massa do recipiente com o agregado (kg);

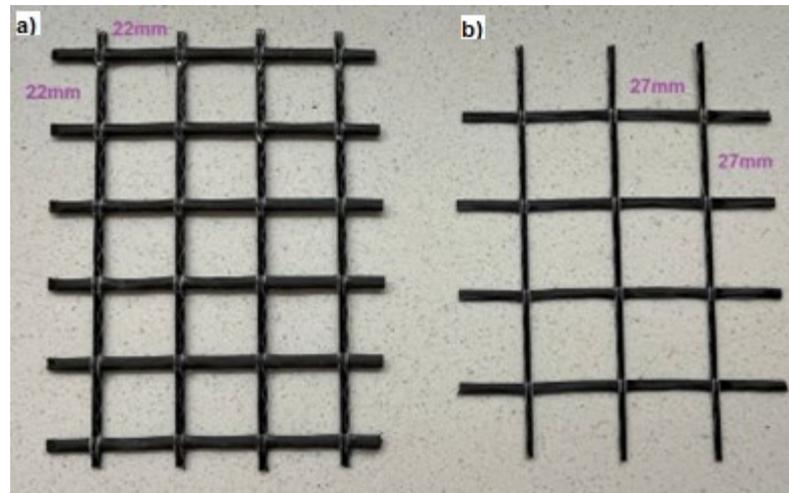
Mr é a massa do recipiente vazio (kg);

V é o volume do recipiente.

3.1.5 Fibra de carbono

Para este estudo, foram utilizadas duas telas em fibras de carbono com dimensões distintas: a HTC 21/21-80, com 22 mm x 22 mm x 1 mm e a HTC 25/25-80, com 27 mm x 27 mm x 0,5 mm, apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Telas de fibra de carbono utilizadas na pesquisa: a) HTC 21/21-80 b) HTC 25/25-80.



Fonte: Autora (2024).

As propriedades físicas das telas empregadas nesta pesquisa foram fornecidas pelo fabricante Hitexbau, cuja documentação técnica detalha as características dos materiais. Esses dados estão devidamente organizados nas Tabelas 2 e 3, nas quais é possível verificar as propriedades que influenciam diretamente o desempenho das telas nos experimentos realizados, como resistência, dimensões e outros parâmetros relevantes para a investigação.

Tabela 2 – Propriedades tela HTC 21/21-80.

Gramatura	Alongamento		Resistência à tração	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
305 g/m ²	1,71%	1,47%	195 kN/m ²	199 kN/m ²

Fonte: Adaptado de Hitexbau (2024).

Tabela 3 – Propriedades tela HTC 25/25-80.

Gramatura	Alongamento		Resistência à tração	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
140 g/m ²	1,47%	1,34%	75 kN/m ²	88 kN/m ²

Fonte: Adaptado de Hitexbau (2024).

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O traço de referência utilizado para a produção do concreto foi desenvolvido pela empresa Perville Construtora, especializada na fabricação de estruturas pré-fabricadas em concreto. Esse concreto apresenta uma resistência mecânica à compressão de 45 MPa aos 28 dias, e um espalhamento de 600 mm, caracterizando-o como um concreto autoadensável de classe SF 1, conforme estabelecido pela ABNT NBR 15823-2. Adicionalmente, o concreto atinge uma resistência mínima de 15 MPa após 18 horas de cura, o que permite uma rápida desforma e a movimentação eficiente das peças de concreto.

O concreto autoadensável de referência foi produzido a partir das quantidades de materiais especificadas na Tabela 4. Todos os vinte e cinco corpos de prova seguiram o mesmo traço base, variando apenas o modelo e a posição da tela no interior do corpo de prova. A mistura da dosagem de concreto foi produzida na usina da própria fábrica, a qual produz 1 m³ de concreto por batelada.

Tabela 4 – Traço do concreto de referência.

Material	Tipo	Quantidade por m³
Areia	Fina	350 kg
Areia	Industrial	690 kg
Brita 0	Industrial	805 kg
Cimento	CP V-ARI	375 kg
Água		185 kg
Aditivo	CQ Flow 8406	3,6 kg

Fonte: Perville Construtora (2024).

As dosagens utilizadas no estudo foram denominadas conforme apresentado na Tabela 5, de acordo com o tipo e a posição arbitrada das telas de fibra adicionadas à mistura. As composições 21x21 (1) e 21x21 (2) utilizam o mesmo tipo de fibra, com abertura de malha de 22 x 22 mm, sendo que na primeira a fibra é posicionada a 1 cm da base do corpo de prova, enquanto na segunda, são inseridas duas telas, uma posicionada a 1 cm do topo e a outra a 1 cm da base inferior do corpo de prova. O mesmo procedimento foi adotado para as composições 25x25 (1) e 25x25 (2), que utilizam da tela com malha de 27 x 27 mm.

Tabela 5 – Corpos de prova produzidas com diferentes posições de telas em carbono.

Composição	Tipo de fibra	Dimensão (mm)	Posição da fibra
REF	-	-	-
21x21 (1)	HTC 21/21-80	22 x 22 x 1,0	1 cm da base
21x21 (2)	HTC 21/21-80	22 x 22 x 1,0	1 cm da base + 1 cm do topo
25x25 (1)	HTC 25/25-80	27 x 27 x 0,5	1 cm da base
25x25 (2)	HTC 25/25-80	27 x 27 x 0,5	1 cm da base + 1 cm do topo

Fonte: Autora (2024).

É importante destacar que, para garantir a posição estabelecida para este estudo, as fibras foram fixadas com cordas de nylon, material cuja presença não exerce influência nas propriedades mecânicas do concreto. O modelo pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Posicionamento das telas em fibra de carbono.



Fonte: Autora (2024).

O traço de referência, que não inclui a adição de fibras, foi empregado como base de comparação para avaliar as diferenças de resistência mecânica entre os compósitos. O objetivo de realizar ensaios considerando diferentes posições das fibras no compósito é analisar a eficiência de cada disposição, verificando sua influência principalmente na resistência à tração na flexão.

Os corpos de prova foram moldados e submetidos à cura conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5738:2016. Optou-se pela moldagem de

cinco corpos de prova para cada formulação no caso dos prismáticos e quatro para os cilíndricos, com o intuito de garantir a confiabilidade dos resultados nas avaliações da resistência mecânica. Os modelos dos corpos de prova cilíndricos podem ser vistos na Figura 11. Uma etapa do processo de moldagem para os prismáticos é apresentada na Figura 12, na qual é possível perceber a tela já posicionada. A Figura 13 apresenta os corpos de prova já moldados.

Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.



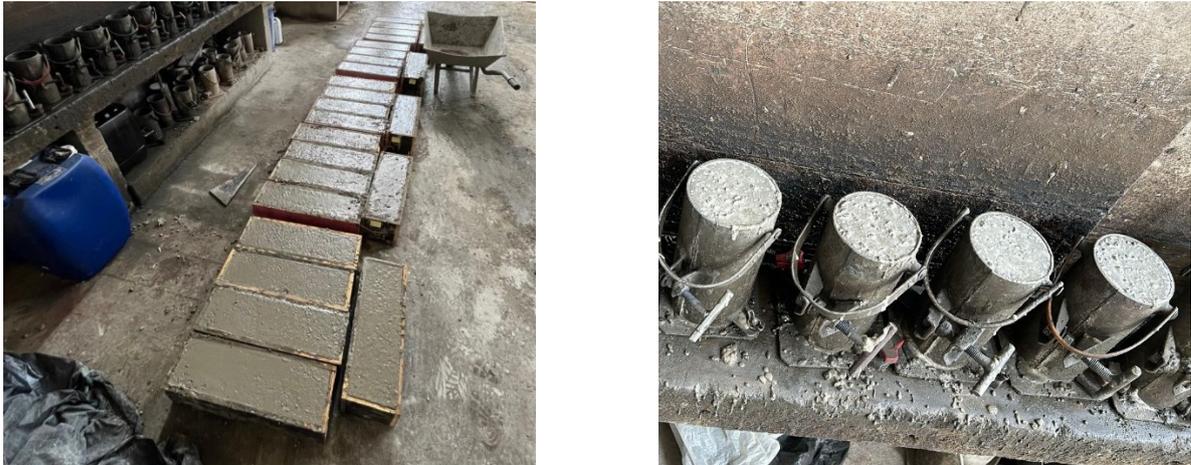
Fonte: Autora (2024).

Figura 12 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autora (2024).

Figura 13 – Corpos de prova moldados.



Fonte: Autora (2024).

Para avaliação da resistência mecânica à compressão, foram moldados corpos de prova cilíndricos com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm, sem a adição de fibras. A resistência à compressão foi avaliada aos 7 e 28 dias de idade. O ensaio de resistência mecânica à flexão foi realizado em corpos de prova prismáticos com dimensões de 15 cm x 15 cm x 50 cm, aos 28 dias de idade. Após os ensaios de resistência à tração, metade dos corpos de prova foi destinada à avaliação de compressão, já com a tela de fibra de carbono incorporada à sua composição, permitindo a comparação dos resultados obtidos.

3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

As propriedades do concreto no estado fresco e endurecido são essenciais para garantir a qualidade e o desempenho do material. A análise das propriedades no estado fresco, como o ensaio de espalhamento, permite ajustar a mistura para garantir a facilidade de aplicação. As características do concreto endurecido proporcionam a avaliação de propriedades como a resistência à compressão, tração à flexão, absorção de água, densidade e permeabilidade do material, garantindo que o concreto atenda aos requisitos de desempenho e durabilidade necessários.

3.3.1 Espalhamento

A verificação do espalhamento foi realizada imediatamente após a mistura do concreto autoadensável (CAA), de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 15823-2:2017. Para isso, foi utilizada uma chapa metálica com dimensões de 90 cm x 90 cm, disposta de forma nivelada. O cone de Abrams foi colocado em posição invertida sobre a chapa, centralizado e preenchido com concreto utilizando uma concha, sendo então erguido verticalmente. O espalhamento é calculado pela média dos três diâmetros perpendiculares medidos após o concreto atingir o repouso. O conjunto está ilustrado na Figura 14 e sua classificação referente ao espalhamento do CAA pode ser definida a partir da Tabela 6.

Figura 14 – Conjunto utilizado para espalhamento do concreto.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 6 – Classe de espalhamento do CAA.

Classe	Espalhamento mm
SF 1	550 a 650
SF 2	660 a 750
SF 3	760 a 850

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017).

3.3.2 Absorção de água, porosidade aberta e densidade aparente

A determinação da absorção de água foi realizada conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 9778:2009. Inicialmente, os fragmentos dos corpos de prova foram acondicionados em uma estufa a uma temperatura de 105 °C durante 72 horas. Após esse período, os corpos de prova foram retirados da estufa e deixados esfriar até atingirem a temperatura ambiente, momento em que foi medida a massa seca de cada amostra. Em seguida, as amostras foram imersas em água a uma temperatura de 23 ± 2 °C por 72 horas. Sua massa imersa foi aferida. Após a imersão, as amostras foram secas superficialmente, e a massa saturada foi registrada. A equação utilizada para o cálculo da absorção de água é a Equação 10, para porosidade aberta utilizou-se a Equação 11 e a densidade aparente é obtida a partir da Equação 12.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (10)$$

$$Pa = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (11)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (12)$$

A é a absorção de água (%);

m_{sat} é a massa da amostra saturada superfície seca (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

Pa é a porosidade aberta (%);

m_i é a massa da amostra imersa em água (g);

ρ_s é a massa específica da amostra seca (g/cm³).

A Figura 15 apresenta parte das amostras divididas para realização do procedimento. É importante destacar que foram empregadas apenas duas amostras para cada tipo de compósito nos ensaios físicos realizados nesta pesquisa, o que pode comprometer a precisão dos resultados obtidos para esta análise em particular.

Figura 15 – Corpos de prova para o ensaio de absorção de água.



Fonte: Autora (2024).

3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para determinação das resistências mecânicas foram utilizadas tanto os ensaios de resistência à compressão quanto a resistência à tração na flexão a prensa de classe 2 da Perville Construtora, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 – Prensa hidráulica utilizada para os ensaios mecânicos.



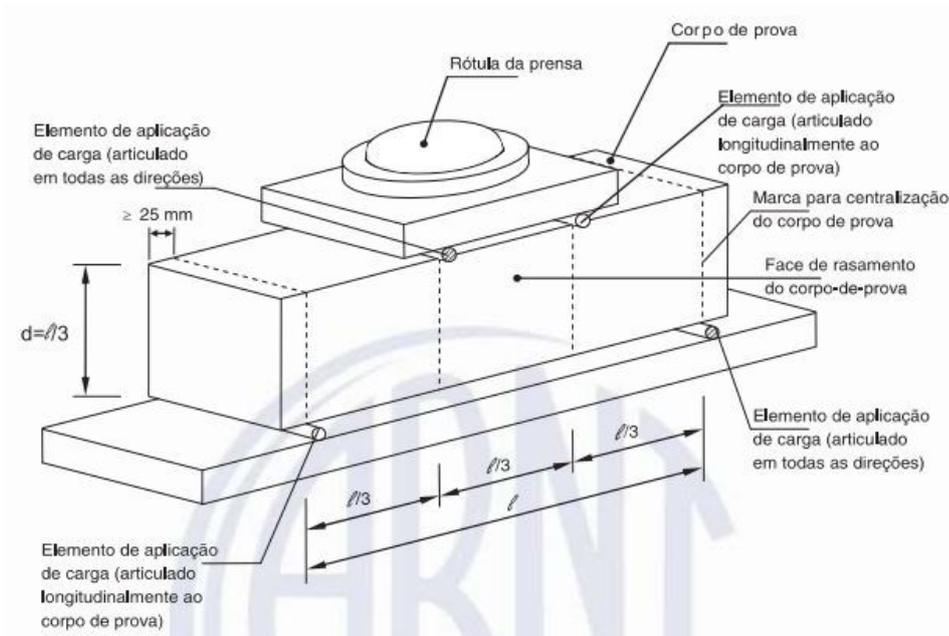
Fonte: Autora (2024).

3.4.1 Resistência à tração na flexão

Esse ensaio é estabelecido pela norma ABNT NBR 12142:2010, para a determinação da resistência à tração na flexão do concreto em corpos de prova

prismáticos. Foram empregados dois apoios, cada um a 2,5 cm das extremidades do prisma analisado, conforme pode ser exemplificado na Figura 17.

Figura 17 – Modelo para realização do ensaio de tração à flexão.



Fonte: ABNT NBR 12142 (2010).

A carga foi aplicada no centro do corpo de prova por meio de uma chapa fixa sobre dois roletes, com espaçamento de 15 cm entre eles. A Figura 18 ilustra a execução do ensaio.

Figura 18 – Execução do ensaio de tração à flexão.



Fonte: Autora (2024).

O cálculo para encontrar a resistência à tração na flexão deve ser realizado com base na Equação 13.

$$f_{ct,f} = \frac{F * l}{b * d^2} \quad (13)$$

Em que:

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão (MPa);

F é a força da máquina de ensaio (N);

l é a dimensão do vão entre apoios (mm);

b é a largura média do corpo de provas (mm);

d é a altura média do corpo de provas (mm).

3.4.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto foi avaliada de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 5739:2018 para os corpos de prova cilíndricos. Para estes corpos de prova, os testes de compressão foram realizados após os períodos de 7 e 28 dias de cura utilizando apenas o concreto de referência, e podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 – Execução do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2024).

A prensa universal fornece os valores de carga aplicada sobre o corpo de prova em toneladas-força (tf), sendo necessário realizar a conversão para a unidade de pressão comumente adotada para concretos, o Mega Pascal (MPa). A conversão é expressa pela Equação 14.

$$f_c = \frac{4 * F * 1000 * 9,81}{\pi * D^2} \quad (14)$$

Em que:

f_c é a resistência à compressão (MPa);

F é a força da máquina de ensaio (N);

D é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Para os ensaios de compressão do concreto reforçado com tela de fibra de carbono, utilizou-se a metade do corpo de prova remanescente do ensaio de tração à flexão. Esses testes foram realizados após o período de 28 dias de cura, seguindo a metodologia estabelecida na Figura 4. Para a realização do rompimento, foram posicionados dois cilindros metálicos com diâmetro de 8,5 cm, um na parte superior e outro na inferior do corpo de prova, para a aplicação da carga. A conversão dos valores de carga para a unidade de pressão em MPa foi efetuada com base na Equação 15.

$$f_c = \frac{F}{\pi * r^2} \quad (15)$$

f_c é a resistência a compressão (MPa);

F é a força da máquina de ensaio (N);

r é o raio do cilindro metálico (mm).

3.5 ANALISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados obtidos, foi empregada a análise de variância (ANOVA) utilizando o software *Statistica*. Essa ferramenta é fundamental para investigar os erros associados ao método experimental e identificar as fontes de

variação do mesmo. A metodologia possibilita a comparação das médias de grupos independentes, permitindo verificar se existem diferenças significativas entre elas.

A partir do método de Tukey, que permite comparar as médias entre os grupos, sendo o intervalo de confiança adotado de 95 %, com nível de significância $\alpha = 0,05$ (Capp *et. al*, 2020). O p-valor representa a probabilidade de ocorrerem valores iguais ou mais extremos do que os obtidos nas estatísticas dos testes. Valores de p menores que o nível de significância ($p \leq \alpha$) indicam uma baixa probabilidade de que as diferenças observadas sejam atribuídas ao acaso, fornecendo, portanto, evidências robustas de que as diferenças são estatisticamente significativas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados para a caracterização dos agregados, bem como as propriedades avaliadas para o estado fresco e o estado endurecido do concreto autoadensável, tanto na sua composição de referência quanto com a adição de telas de fibras de carbono em diferentes posicionamentos e aberturas de malha.

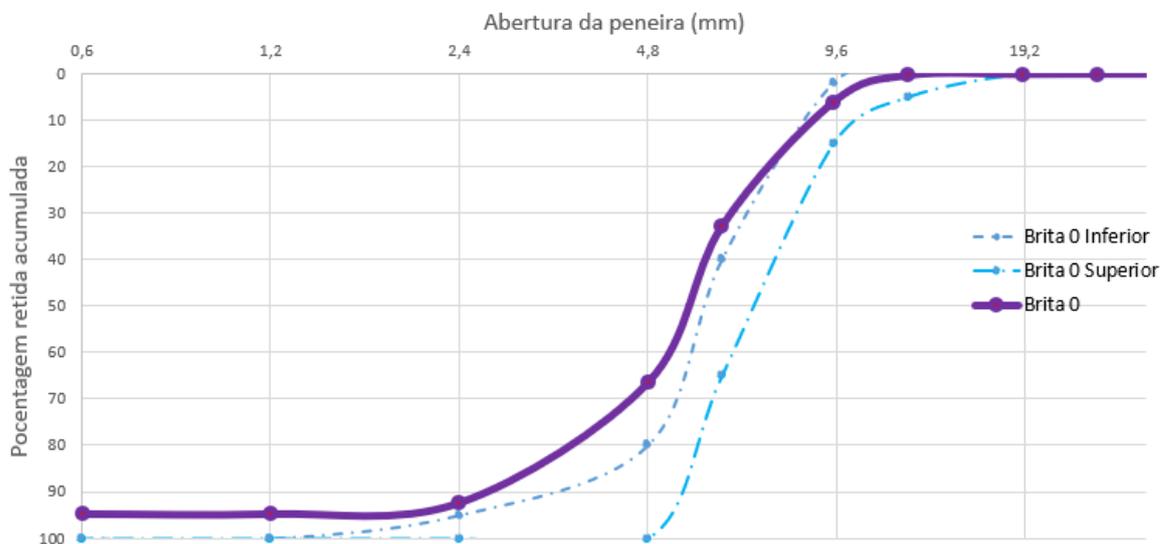
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A análise das propriedades dos agregados, como sua granulometria, massa específica e massa unitária, evidencia a sua influência no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido, tais como resistência mecânica e trabalhabilidade.

4.1.1 Distribuição granulométrica dos agregados

Realizaram-se ensaios de granulometria tanto para o agregado graúdo quanto para os agregados miúdos presentes no concreto autoadensável (CAA) utilizado neste estudo. A partir dos resultados obtidos nesses ensaios, foi possível traçar a curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo, apresentada no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: Autora (2024).

Pode-se verificar que o agregado graúdo não se encontra dentro das faixas da brita 0 inferior e superior, situando-se ligeiramente acima do limite da brita 0 inferior. Isso indica uma maior concentração de granulares finos, o que, no entanto, não gera maiores problemas para o CAA.

Com base na distribuição granulométrica realizada, foram calculados o módulo de finura e a dimensão máxima característica do mesmo agregado. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 7.

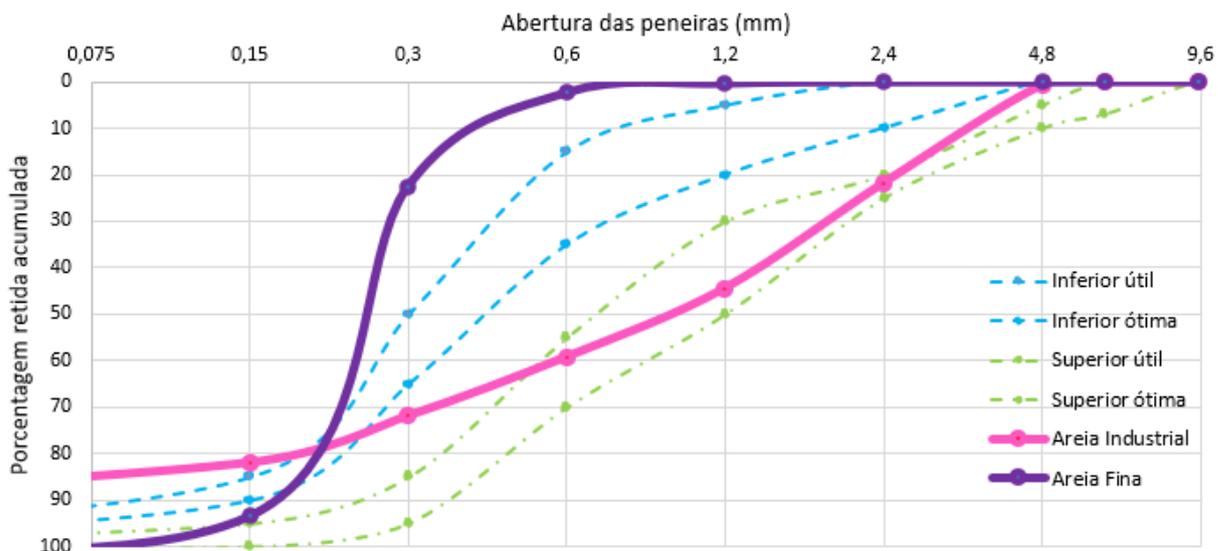
Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)
Brita 0	5,44	12,50

Fonte: Autora (2024).

Os agregados miúdos utilizados na fabricação do concreto autoadensável foram a areia natural e a areia industrial. A distribuição granulométrica dos mesmos é exibida no Gráfico 2. O módulo de finura e a dimensão máxima característica desses agregados estão detalhados na Tabela 8.

Gráfico 2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 8 – Módulo de finura agregado miúdo.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)
Areia Fina	1,19	4,75
Areia Industrial	2,80	4,75

Fonte: Autora (2024).

No gráfico apresentado, observa-se a curva de distribuição da areia industrial posicionada entre a curva superior útil e a curva superior ótima, com módulo de finura de 2,80, o que a caracteriza como uma areia de granulometria média. Já a areia natural está localizada acima da linha inferior útil, confirmando sua classificação como areia fina, com módulo de finura de 1,19.

4.1.2 Massa específica e massa unitária dos agregados

Os resultados de massa específica aparente para o agregado graúdo, massa específica seca, saturado superfície seca e a absorção de água do mesmo, são apresentados na Tabela 9. Os valores obtidos em ensaio são coerentes com os materiais usualmente empregados na construção civil.

Tabela 9 – Massa específica agregado graúdo.

Brita 0	
Massa específica aparente agregado saturado superfície seca	2,59 (g/cm ³)
Massa específica do agregado seco	2,54 (g/cm ³)
Massa específica aparente	2,67 (g/cm ³)
Absorção de água	1,79 %

Fonte: Autora (2024).

A Tabela 10 mostra a média das duas amostras resultantes do ensaio de massa específica, obtidos para ambos os agregados miúdos.

Tabela 10 – Massa específica dos agregados miúdos (g/cm³).

	Areia Fina	Areia Industrial
Massa específica agregado saturada superfície seca	2,51	2,58
Massa específica aparente do agregado seco	2,50	2,55
Massa específica aparente	2,53	2,61

Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos para a areia industrial estão de acordo com os encontrados por Krause (2021). Para a areia fina, os resultados podem ser relacionados com os dados mostrados por Menossi (2004).

A massa unitária característica de cada um dos agregados utilizados nesta pesquisa é observada na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado da massa unitária dos agregados (g/cm³).

Agregado miúdo		Agregado graúdo
Areia fina	Areia industrial	Brita 0
1,64	1,91	1,57

Fonte: A autora (2024).

Os resultados do ensaio assemelham-se aos obtidos por Krause (2021) para a areia industrial e a brita 0, além de estarem em conformidade com a ficha de informação de segurança de produto químico (FISPQ) da Mineração Veiga (2018) para a areia fina, confirmando seus dados.

4.2 DOSAGEM DO CONCRETO

Esta seção apresenta os resultados do espalhamento do concreto autoadensável, bem como os resultados dos corpos de prova com a adição de telas de fibra de carbono em diferentes posições, com o objetivo de analisar sua eficiência quanto ao posicionamento. Além disso, são apresentados comparativos com estudos previamente publicados que abordam a utilização de fibra de carbono, destacando-se, no entanto, que esses trabalhos possuem diferentes traços e tipos de telas. Portanto, tais comparações serão relativizadas por conta das matérias primas, traços e demais materiais utilizados.

4.2.1 Ensaio de espalhamento

Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento do concreto autoadensável foram calculados pela média dos três diâmetros perpendiculares medidos após o concreto atingir o estado de repouso. Conforme ilustrado na Figura 20, os valores obtidos foram, respectivamente, 610 mm; 600 mm e 640 mm.

Figura 20 - Espalhamento do CAA.



Fonte: Autora (2024).

A média dos valores obtidos foi de 616 mm, o que classifica o concreto autoadensável na categoria SF 1, conforme a norma estabelecida. A classe de espalhamento de acordo com a utilização do concreto autoadensável está apresentada na Figura 21, e indica que o concreto classificado como SF 1 é adequado para aplicações em estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura, incluindo aquelas com elementos embutidos. Esse contexto está relacionado à presente pesquisa, que se concentra no uso de telas de fibra de carbono que não apresentam elevada taxa de armadura.

Figura 21 – Classificação do CAA de acordo com sua utilização.

Classe de espalhamento	Espalhamento mm	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre Estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável	Lajes Estacas e certas fundações profundas
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

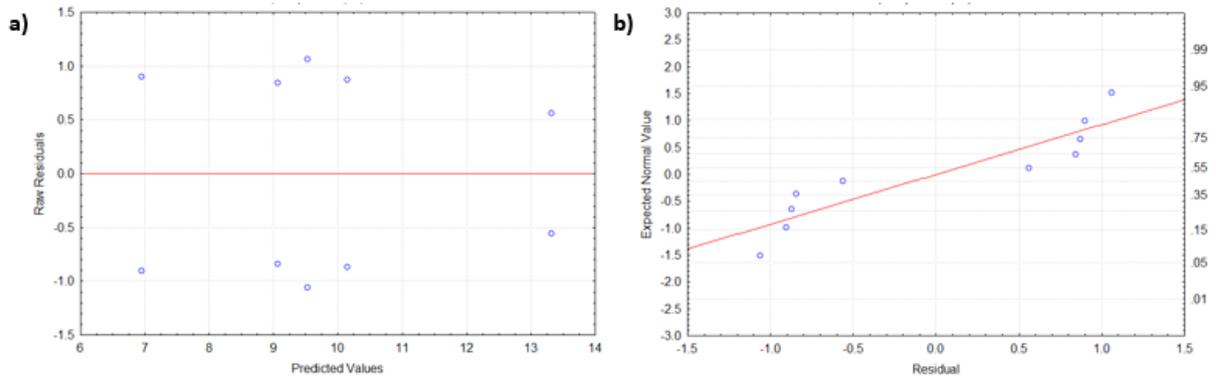
Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017).

4.2.2 Ensaio de porosidade aberta

O concreto é um material com certa porosidade (propriedade de apresentar poros ou vazios), sendo esta uma avaliação de grande importância para a durabilidade do material (Pires *et. al* 2017).

O Gráfico 3a apresenta uma distribuição aleatória dos resultados para o ensaio de porosidade aparente, com valores abaixo e outros acima da média, apresentando dessa forma que, de modo geral, há um equilíbrio na distribuição dos resultados. Para o Gráfico 3b, a tendência de normalidade da porosidade aparente é satisfatória e atende ao critério para aplicabilidade do método de análise de variância (ANOVA). Há de se ressaltar que o número limitado de réplicas dificulta uma perfeita sobreposição sobre a reta.

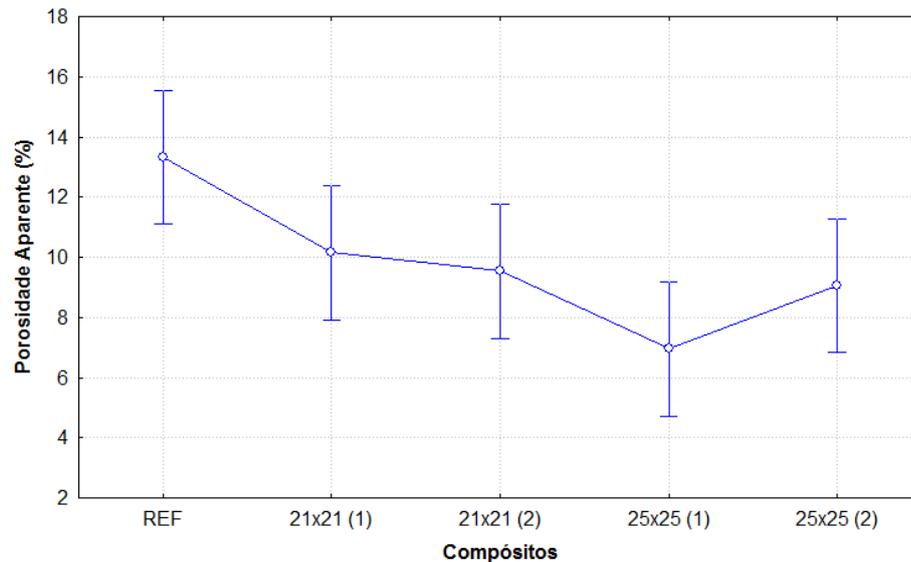
Gráfico 3 – Porosidade aparente: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos no Gráfico 4 estão relacionados à variação de aberturas da malha na matriz de concreto, conforme Tabela 5. Com os dados utilizados na construção do gráfico, verifica-se que a média da porosidade aparente da amostra de referência é ligeiramente superior quando comparada às amostras com telas no seu interior, alcançando 13,33 %. As amostras com telas detêm uma média de 8,93 % e, dessa forma, foi observado que a adição de tela ao compósito proporciona uma diminuição de 29,24 % de porosidade aparente.

Gráfico 4 – Porosidade aparente em relação aos compósitos.



Fonte: Autora (2024).

É importante salientar que a amostra com o maior percentual de variação em relação à referência foi para a tela 25x25 (1), a qual apresentou uma porosidade média de 9,54 %. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de apenas duas amostras terem sido avaliadas, o que pode ter influenciado os resultados devido a um possível erro de amostragem.

A Tabela 12 apresenta a análise de variância dos dados, indicando que o p-valor é inferior ao nível de significância, sugerindo que ao menos um dos compósitos têm impacto significativo sobre a porosidade aparente em relação aos demais.

Tabela 12 – Análise da variância da porosidade aparente.

	SS	FD	MS	F	p
Compósitos	42,5844	4	10,6461	7,1343	0,026839
Erro	7,4612	5	1,4922		

Fonte: Autora (2024).

Contudo, ao examinar mais detalhadamente as diferentes telas incorporadas à matriz de concreto (Tabela 13), observa-se que há diferença significativa entre a tela 25x25 (1) e a referência. Quanto as demais telas, não há diferença significativa entre elas. Esse comportamento pode ser atribuído ao valor elevado do intervalo de confiança que, em geral, foi mais amplo, tornando os diferentes níveis de tratamento não significativos.

Tabela 13 – Média pareada da porosidade aparente.

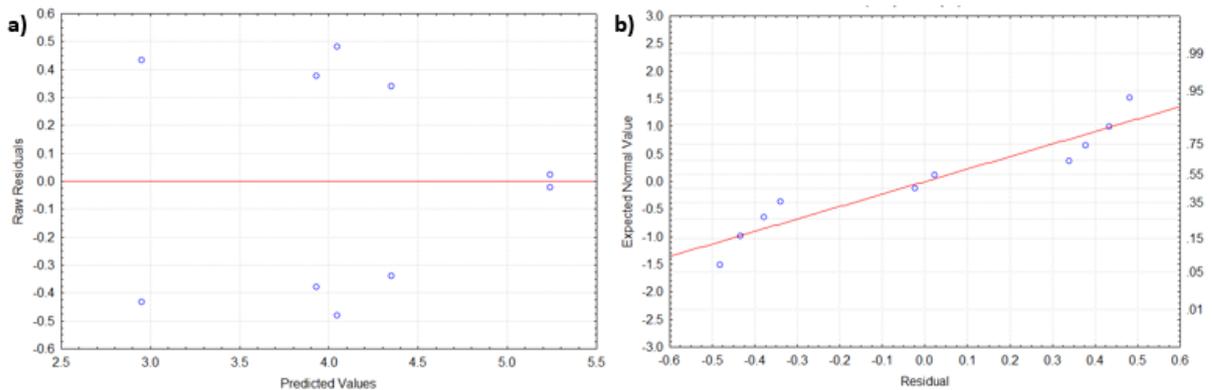
	Porosidade aparente (%)	1	2
25x25 (1)	6,95	****	
25x25 (2)	9,07	****	****
21x21 (2)	9,54	****	****
21x21 (1)	10,15	****	****
REF	13,33		****

Fonte: Autora (2024).

4.2.3 Ensaio de absorção de água

O Gráfico 5a, mostra que a dispersão dos resultados atende uma organização satisfatória, enquanto no Gráfico 5b, tem-se a tendência satisfatória da normalidade quanto aos dados obtidos.

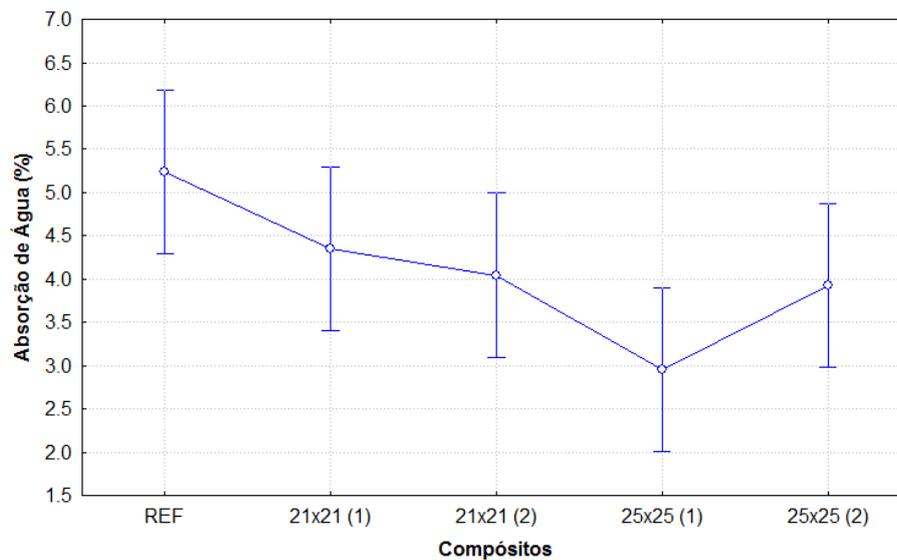
Gráfico 5 – Absorção de água: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade



Fonte: Autora (2024).

Os resultados de absorção de água para os compósitos estudados neste trabalho, são apresentados no Gráfico 6. Nota-se que, assim como na propriedade anterior, há um comportamento distinto para a tela 25x25 (1) se comparado as demais.

Gráfico 6 – Absorção de água em relação aos compósitos.



Fonte: Autora (2024).

Ao observar mais detalhadamente o Gráfico 6, percebe-se que a média do compósito de referência resultou em 5,24 % de absorção de água, enquanto os compósitos com a tela HTC 25/25-80 e HTC 21/21-80 tem 3,99 % e 3,65 %, respectivamente. Sendo assim, nota-se que não houve uma variação significativa da absorção de água entre eles.

A ANOVA e a média pareada da absorção de água, são apresentadas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Na referida tabela, percebe-se que o p-valor é praticamente igual a 0,05, indicando um valor marginal entre a diferença significativa e a não significativa dos corpos de prova quanto ao tipo e posicionamento das telas.

Tabela 14 – Análise da variância da absorção.

	SS	FD	MS	F	p
Compósitos	5,4174	4	1,3544	4,9991	0,048684
Erro	1,3546	5	0,2709		

Fonte: Autora (2024).

Verificando a média pareada, nota-se o mesmo comportamento já observado para o ensaio de porosidade aparente. Que há diferença significativa apenas entre a tela 25x25 (1) e a referência. Para os demais compósitos, não são apresentadas diferenças significativas em seus resultados.

Tabela 15 – Média pareada da absorção.

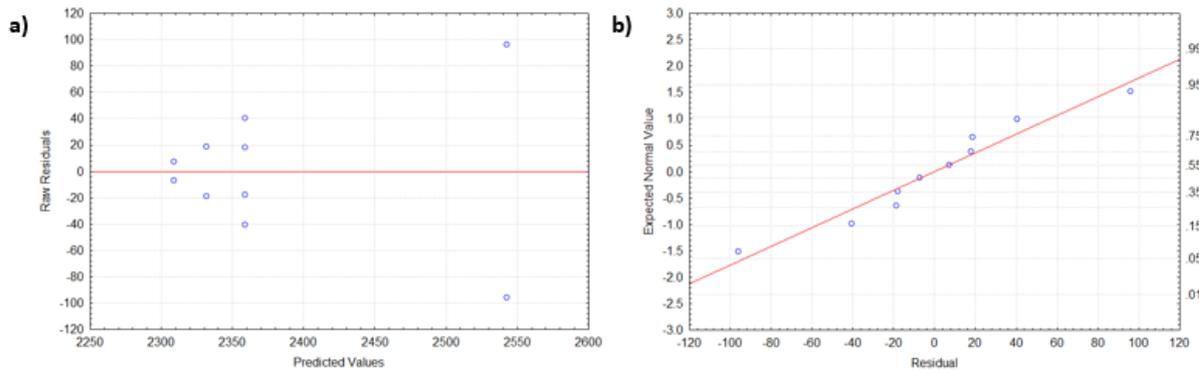
Absorção de Água (%)	1	2
25x25 (1)	2,95	****
25x25 (2)	3,93	****
21x21 (2)	4,05	****
21x21 (1)	4,35	****
REF	5,24	****

Fonte: Autora (2024).

4.2.4 Ensaio de densidade aparente

O Gráfico 7a e 7b apresentam a dispersão dos resultados e a tendência a normalidade para a densidade aparente dos compósitos estudados.

Gráfico 7 – Densidade aparente: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade

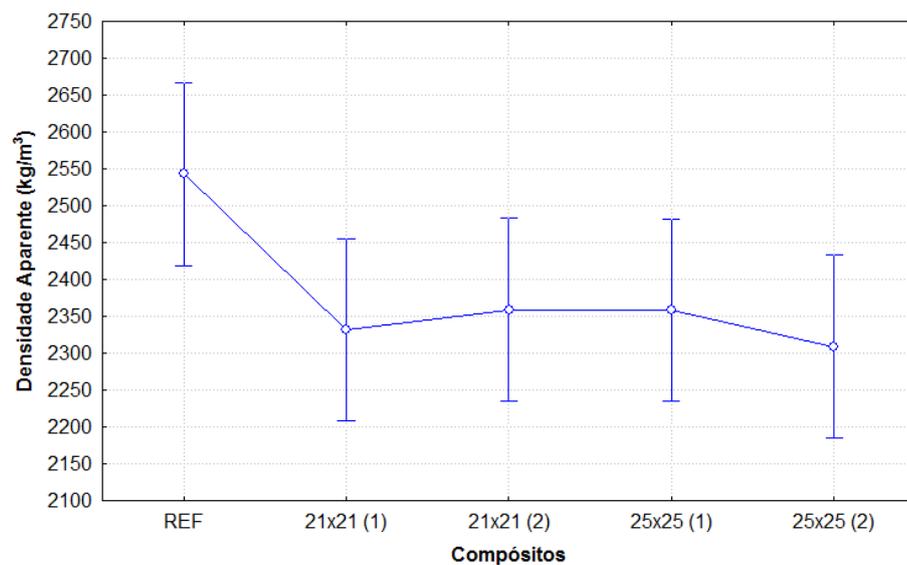


Fonte: Autora (2024).

Para o Gráfico 7a, nota-se uma maior diferença quanto a distribuição residual dos dados, em especial para os valores próximos a 2.550 kg/m³. Esse comportamento pode estar relacionado a uma possível ocorrência de erro experimental, mas também ao fato do uso de poucas réplicas. No entanto, os demais dados mantêm um equilíbrio geral, também atendendo tendência de normalidade expressa no Gráfico 7b.

O Gráfico 8 representa os valores da densidade aparente dos compósitos de referência e também aqueles com a incorporação das telas de fibra de carbono na matriz do concreto.

Gráfico 8 – Densidade aparente em relação aos compósitos.



Fonte: Autora (2024).

Ao analisar o Gráfico 8, a densidade aparente da amostra de referência é ligeiramente superior quando comparada às demais amostras contendo telas em sua estrutura, com $2,54 \text{ g/cm}^3$. Os resultados entre os compósitos com telas variaram, nesta ordem, entre $2,33 \text{ g/cm}^3$ e $2,34 \text{ g/cm}^3$ para HTC 25/25-80 e HTC 21/21-80. Ao fazer uma comparação entre todas as médias e considerando o intervalo de confiança, tais variações não representam uma diferença relevante estatisticamente (Tabela 16 e 17).

Tabela 16 – Análise da variância da densidade aparente.

	SS	DF	MS	F	p
Compósitos	69637	4	17409	3,75	0,089714
Erro	23193	5	4639		

Fonte: Autora (2024).

Tabela 17 – Média pareada da densidade aparente.

	Densidade aparente (kg/m^3)	1
25x25 (2)	2308,87	****
21x21 (1)	2331,55	****
25x25 (1)	2358,69	****
21x21 (2)	2359,07	****
REF	2542,85	****

Fonte: Autora (2024).

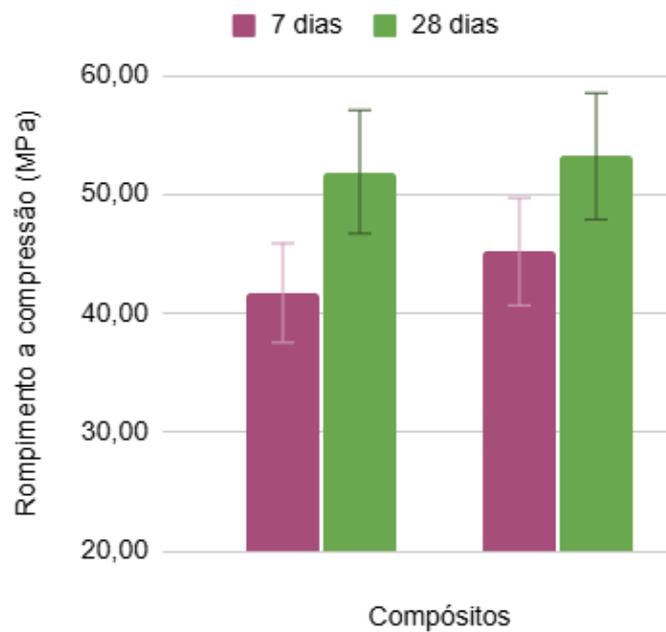
Cabe lembrar que, devido ao fato de os resultados serem provenientes de duas réplicas e à alta sensibilidade da determinação à variação das massas, a densidade aparente das amostras pode ter sido afetada. Esse fator pode justificar o fato de o p-valor ter sido superior ao nível de significância, indicando que as telas empregadas como reforço não apresentam impacto significativo. De maneira similar, a análise da média pareada segue a mesma tendência de avaliação.

4.2.5 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos

O Gráfico 9 apresenta os valores de resistência à compressão do concreto moldado em corpo de prova cilíndrico para diferentes idades, utilizando o traço de

referência. Tal ensaio foi realizado com o objetivo de acompanhar o crescimento evolutivo da resistência ao longo do tempo e validar o traço utilizado para a confecção dos corpos de prova. Dessa forma, foi possível perceber uma evolução consistente das resistências ao longo do tempo.

Gráfico 9 – Resistência a compressão para o traço de referência do concreto autoadensável aos 7 e 28 dias de cura.



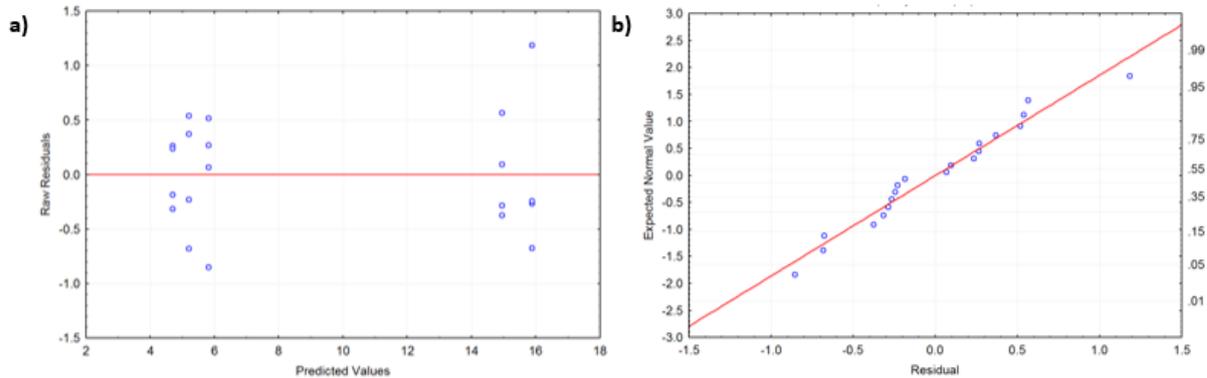
Fonte: Autora (2024).

Aos 7 dias de cura, o concreto atingiu uma resistência à compressão axial média de 46,79 MPa, enquanto aos 28 dias de cura, aumentou para 49,19 MPa, valores que se aproximam dos resultados previstos para a dosagem do concreto experimental.

4.2.6 Ensaio de resistência a tração na flexão

Os Gráficos 10a e 10b indicam a dispersão dos resultados e a tendência a normalidade, respectivamente. Nota-se que os resultados seguem uma mesma tendência de aleatoriedade (Gráfico 10a) entre seus arranjos, sendo um parâmetro importante para validação de uma estatística confiável. O Gráfico 10b apresenta uma distribuição normal satisfatória, com a maior parte dos valores disposta sobre a reta inclinada.

Gráfico 10 – Resistência à tração na flexão: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados obtidos a partir da ANOVA (Tabela 18) revelam que o p-valor é inferior a 0,05, o que sugere relevante influência estatística sobre a resistência à tração na flexão.

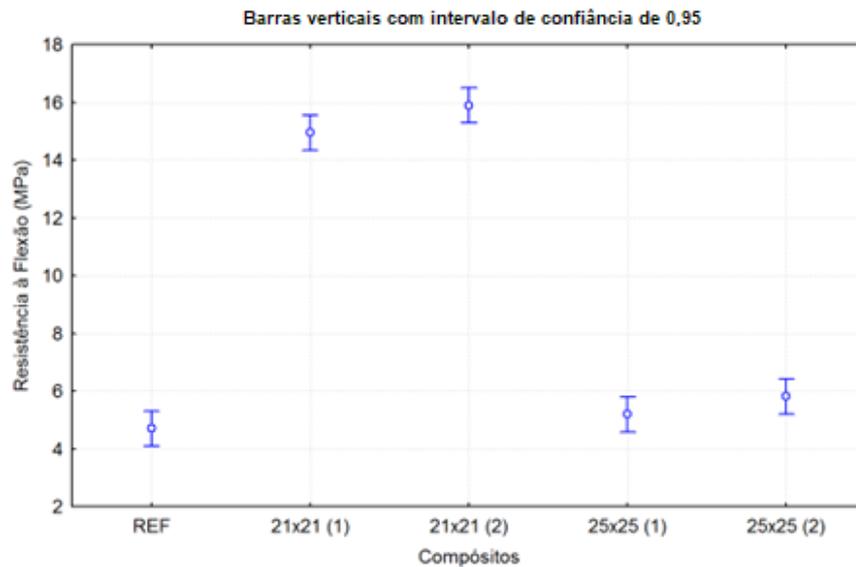
Tabela 18 – Análise da variância da resistência a tração na flexão.

	SS	DF	MS	F	p
Compósitos	501,78	4	125,45	390,91	0,00000
Erro	4,81	15	0,32		

Fonte: Autora (2024).

O comparativo entre as médias das resistências à tração na flexão (Gráfico 11), indica que os desempenhos dos concretos reforçados com telas de fibra de carbono superaram as do concreto de referência.

Gráfico 11 – Variação de resistência a tração na flexão do concreto com adição de tela em fibra de carbono aos 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2024).

Os corpos de prova tipo 21x21 (1) e 21x21 (2) superaram em 217,43% e 237,64% o desempenho alcançado pela referência, respectivamente. Contudo, ao serem comparadas entre si (21x21 (1) e 21x21 (2)), uma diferença mais discreta, de 6,37%, foi observada. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de a armadura estar localizada na parte superior do corpo de prova 21x21 (2), não exercendo função para tração da tela e sim, sendo comprimida. Por outro lado, a utilização dessa configuração torna-se particularmente eficiente em aplicações como painéis de concreto, nas quais contribui para minimizar o risco de erros durante a montagem de pré-fabricados em canteiro de obras.

Já para os corpos de prova tipo 25x25 (1) e 25x25 (2) os incrementos na resistência à tração foram de 10,49% e 23,47%, respectivamente, quando comparadas à referência. Porém, por haver um grande intervalo de confiança, tais resultados não se mostraram significativos. Ao serem comparadas entre si (25x25 (1) e 25x25 (2)), um aumento de 11,75% foi alcançado, denotando uma maior eficiência em relação às formulações 21x21 (1) e 21x21 (2) comparadas entre si.

Percebe-se ainda, que a resistência obtida apresentou um aumento mais significativo nas amostras com telas HTC 21/21-80, contrastando as telas HTC 25/25-80, também podendo estar relacionado as propriedades das telas analisadas individualmente, conforme apresentam as Tabelas 2 e 3.

Essa característica pode ser confirmada pela Tabela 19, na qual o compósito com telas HTC 25/25-80 apresentou resultados estatisticamente equivalentes aos do concreto de referência, indicando a ausência de diferenças significativas entre os resultados. Na mesma Tabela, também pode ser visto que os compósitos reforçados com duas telas apresentam resultados estatisticamente equivalentes entre si, não demonstrando benefícios significativos em sua aplicação na composição utilizada.

Tabela 19 – Média pareada de resistência a flexão.

Compósitos	Resistência à Flexão (MPa)	1	2
REF	4,71	****	
25x25 (1)	5,20	****	
25x25 (2)	5,81	****	
21x21 (1)	14,95		****
21x21 (2)	15,90		****

Fonte: Autora (2024).

As Figuras 22 e 23 mostram o processo de ruptura dos corpos de prova após o ensaio de tração na flexão. Observa-se que o concreto de referência (Figura 22) apresenta um comportamento frágil ao alcançar seu valor máximo, enquanto os concretos reforçados com telas de fibra de carbono (Figura 23) exibem fissuras sinalizando o início de sua ruptura, com comportamento mais dúctil. Nos compósitos reforçados com fibras, verificou-se que as telas apresentaram um nível de escoamento tal que, ao menos do ponto de vista macroscópico, permitiram o rompimento do concreto.

Figura 22 - Rompimento dos corpos de prova de referência.



Fonte: Autora (2024).

Figura 23 – Rompimento dos corpos de prova reforçados com tela.



Fonte: Autora (2024).

O posicionamento das fibras na matriz de concreto ficou evidenciado após o rompimento das amostras. Na Figura 24 é possível observar a tela de fibra de carbono posicionada a 1 cm da base do corpo de prova.

Figura 24 – Posicionamento das telas de carbono em relação a matriz de concreto.



Fonte: Autora (2024).

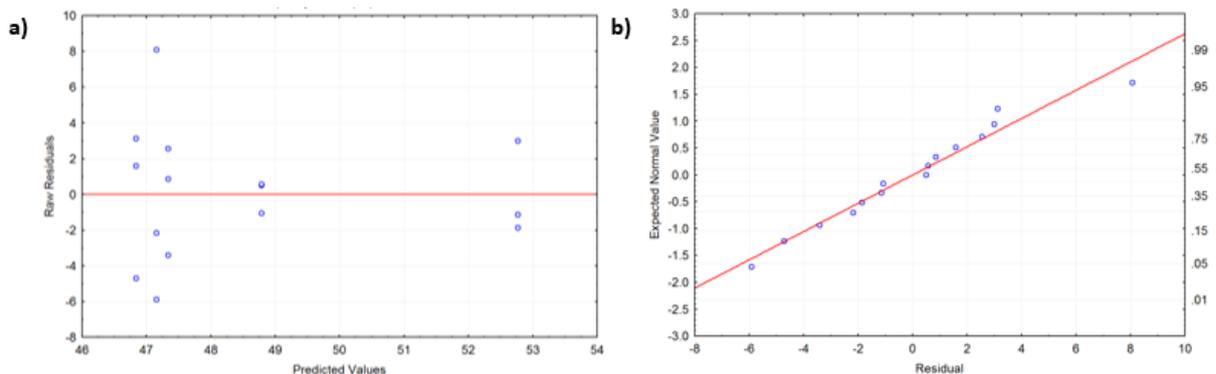
Em termos comparativos com a literatura, o aumento na resistência à tração na flexão observado no compósito sem tela em comparação aos compósitos com uma

ou duas telas é corroborado pela pesquisa de Kang, Chai e Hong (2021), que concluem que o concreto utilizado em seu estudo apresenta um aumento de 7% quando uma tela de fibra de carbono foi adicionada a mistura, e de 15% quando duas telas são incorporadas.

4.2.7 Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos

O Gráfico 13a, ilustra a tendência de normalidade, atendendo ao critério para aplicabilidade do método de análise e variância. Os resultados indicam uma distribuição normal adequada, semelhante ao comportamento observado no ensaio descrito no subtópico anterior. No Gráfico 13b, a distribuição dos resíduos indica que as amostras estão mais dispersas no que se refere à resistência à compressão.

Gráfico 12 – Resistência a compressão: a) Dispersão dos resultados; b) Tendência a normalidade.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 20. Esses dados apresentam que o p-valor é superior ao nível de significância para os compósitos, indicando uma influência estatística não significativa sobre os resultados, ou seja, as telas utilizadas para a composição dos ensaios não apresentam diferenças entre si quando utilizadas para compressão.

Tabela 20 – Análise da variância da resistência a compressão.

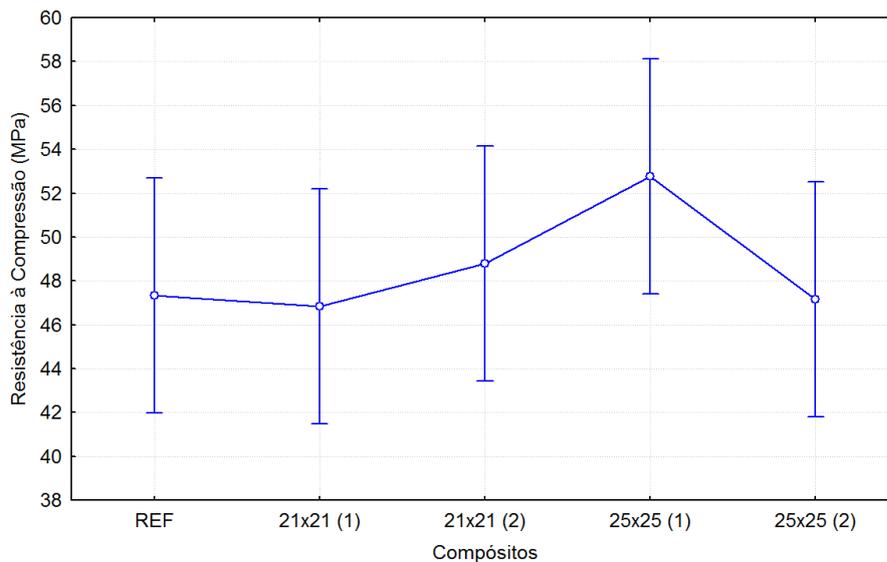
	SS	DF	MS	F	p
Compósitos	72,72	4	18,18	1,048	0,430404
Erro	173,55	10	17,35		

Fonte: Autora (2024).

O Gráfico 14 apresenta os resultados do ensaio de compressão realizado em corpos de prova contendo telas de fibra de carbono, considerando os compósitos apresentados anteriormente para o posicionamento das telas.

A resistência a compressão dos corpos de prova tipo 21x21 (1) e 21x21 (2) tiveram um aumento de 0,30% e 0,56% em relação ao compósito de referência, respectivamente. Ao serem comparadas entre si, evidenciou-se um aumento de 0,26%. Os compósitos com tela 25x25 (1) aumentaram a resistência a compressão 4,55% enquanto a 25x25 (2) diminuiu 12,09% em relação a referência. Ao compará-las, a tela 25x25 (2) apresentou um aumento de 15,91% a 25x25 (1). Tal fato é um indicativo de que as telas não auxiliam na resistência à compressão do concreto.

Gráfico 13 – Variação de resistência à compressão do concreto com adição de tela em fibra de carbono aos 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2024).

Em relação ao Gráfico 14, complementa-se que não houve diferença significativa na resistência do concreto reforçado com telas de fibra de carbono quando comparado ao concreto de referência. Esse resultado é corroborado pela média pareada de resistência à compressão apresentada na Tabela 21, a qual confirma, de forma estatística, a equivalência entre os resultados.

Tabela 21 – Média pareada de resistência a compressão.

Compósitos	Resistência à Compressão (MPa)	1
REF	47,34	****
25x25 (1)	52,77	****
25x25 (2)	47,15	****
21x21 (2)	48,79	****
21x21 (1)	46,84	****

Fonte: Autora (2024).

O comportamento deste ensaio certifica que as telas de fibra de carbono atuam principalmente na resistência à tração do concreto, sendo eficazes na distribuição de esforços tracionais. Dessa forma, os resultados obtidos mantiveram-se próximos à média de 45 MPa, valor projetado para a dosagem do concreto utilizado.

Ao analisar os ensaios realizados por Li *et al.* (2022), nota-se que o mesmo fato é apontado, indicando que o posicionado de tela na parte superior do compósito teve o menor valor mesmo sob compressão, devido ao efeito de flexão dos corpos de prova.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades do concreto autoadensável com a incorporação de telas de fibra de carbono em duas posições dentro da matriz.

As propriedades físicas avaliadas, como a porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente, são benéficamente afetadas pela incorporação das telas ao compósito, no entanto, não apresentam variações significativas para os distintos posicionamentos e aberturas da malha se comparadas entre si. A porosidade aberta apresentou uma diminuição de 29,24% comparativamente à referência. A absorção de água mostrou um comportamento similar, com uma diminuição de cerca de 27% para os mesmos compósitos. A densidade aparente também sofre influência da incorporação das telas à mistura, apresentando uma diminuição de 8,27% para esta propriedade.

A resistência mecânica à compressão dos concretos autoadensáveis reforçados com fibras não apresentou variações estatísticas significativas em relação à referência. Em contra partida, a resistência à tração na flexão apresentou crescimento expressivo. Os compósitos com telas HTC 21/21-80 atingiram em média um aumento de 227,53% na resistência à tração na flexão se relacionados ao concreto de referência. Em contraste, as telas HTC 25/25-80 apresentaram uma evolução média de 16,98%. Tal análise pode estar associada às telas HTC 21/21-80 possuírem uma resistência à tração transversal de 199 kN/m², conforme foi apresentado na Tabela 2, enquanto as telas HTC 25/25-80 apresentam resistência de 88 kN/m².

Ao comparar diretamente a aplicação de uma tela posicionada a 1 cm da base e a utilização de duas telas — uma posicionada a 1 cm da base e a outra a 1 cm do topo da estrutura — observou-se que os resultados não apresentaram variações significativas. Desta forma, a aplicação de mais telas na configuração utilizada não se mostrou de relevância considerável para o desempenho mecânico do material. Vale ressaltar, que à resistência a tração na flexão aumentou expressivamente, enquanto os resultados obtidos a partir das análises físicas diminuiram, o que pode apresentar uma melhora no fator durabilidade do material.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar ciclos de molhagem e secagem dos corpos de prova com tela em fibra de carbono para averiguar a durabilidade do material ao longo do tempo;
- Realizar estudo para examinar a viabilidade de compor telas de fibra de carbono com fibras soltas em uma mesma amostra;
- Investigar o posicionamento de duas ou mais telas na parte inferior do corpo de prova, para observar o impacto da resistência à tração na flexão;
- Estudar diferentes posicionamentos da tela no interior da matriz de concreto, analisando qual arranjo proporciona um melhor resultado para os ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**. Concreto autoadensável - Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**. 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: ABNT 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**. Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**. Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT 2009.

- BEBER, J. A. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
- CABRAL, H. M. **Caracterização de malhas têxteis de fibras de vidro e carbono empregadas como reforço do concreto têxtil**. Artigo científico (Iniciação científica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale, 2018.
- CAMARGO QUÍMICA. **Superplastificante para concreto UHPC**. Blumenau, 2023.
- CAPP, E., et al. **Bioestatística quantitativa aplicada**. 2020. Programa de Pós Graduação em Ciências da Saúde: Ginecologia e Obstetrícia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- CARVALHO, A. H. Z.; FREITAS, J. C. F. **Estudo comparativo da areia industrial em substituição à areia natural em concretos por meio de ensaios de caracterização física do agregado**. 2017. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Tecnológico de Caratinga, Caratinga, 2017.
- CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **Indústria de agregados para construção civil na região metropolitana de Fortaleza**. 2012. Fortaleza: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2012. 110 p.
- CIA DE CIMENTO ITAMBÉ. **Relatório de ensaios de cimento**. Itajaí, 2023.
- Concreto & Construções. São Paulo, IBRACON, 2009. Volume 53.
- COSTA, M. J. **Avaliação do Uso da Areia Artificial em Concreto de Cimento Portland: Aplicabilidade de um Método de Dosagem**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2005.
- FABRO, F., et al. **Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto**. Revista IBRACON de estruturas de materiais. Volume 4, número 2, 2011, p. 191-212.
- FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1.
- FORTES, A. S. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2000. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FREITAS, M. L. M. X. História e Historiografia da Arquitetura e do Urbanismo Modernos no Brasil. **Concreto armado no brasil: invenção, história, revisões.** Salvador: DOCOMOMO, 2019.

GABARDO, B. P. **Desempenho de concreto com reforço de tecido de fibra de carbono.** 2019. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais - IBRACON,** n. 29, 2010,

HITEXBAU. **Ficha técnica HTC 21/21-80.** Alemanha, 2024.

HITEXBAU. **Ficha técnica HTC 25/25-80.** Alemanha, 2024.

HOLSBACH, T. S. **Avaliação da substituição de areia natural por areia artificial em argamassa de cimento cal e areia para assentamento.** 2004. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALÉ, G. R. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017.

KANG, S.; CHAI, C.; HONG, S. **Evaluation of Carbon Fiber Grid Reinforced Concrete Panel for Disaster Response and Improved Seismic Performance.** Applied Sciences. 2021, 11, 5223.

KRAUSE, V. R., **Estudo da influência das fibras de aço e polipropileno nas propriedades do concreto autoadensável.** 2021. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

LEBRÃO, G. W. Fibra de carbono. **Revista Plástico Sul.** 2008.

LORENZETTI, U. V. **Avaliação de características associadas à durabilidade de concretos em função da cura, da dosagem e do tipo de cimento.** 2002. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para construção civil.** 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2010. 432p.

MACHADO, A. P. Fibras de Carbono – Manual prático de dimensionamento. Edição BASF, 2006.

Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. G. C. Isaia. 3ªed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume1.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propiedades y materiales**. México: Imcyc, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais**, São Paulo, Pini, 1994

MENOSSEI, R. T., **Utilização de pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, São Paulo, 2004.

MINERAÇÃO VEIGA. **FICHA DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO ET 850.21**. Areia quartizolítica PM grossa. Araquari, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. **Self-compacting concrete**. Journal Of Advanced Concrete Technology. Japão, p. 5-15. 2003.

PIRES, D. M., et. al. **Permeabilidade e durabilidade de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por resíduos da construção civil**. In: XXV Seminário de Iniciação Científica, 2017, Ijuí. Rio Grande do Sul: UNIJUI, 2017.

PITTA, M. R. **Construção de pavimentos de concreto simples**. 3 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998. 88 p.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

REPETTE, W. L., et al. Uso de cinza pesada na produção de concreto autoadensável. In: VI CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: CITENEL, 2011.

RODOLPHO, P. M. **Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada**. 2007. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

RUDNICK MINÉRIOS. **Brita Zero**. Rudnick Minérios, 2024. Disponível em: <https://www.rudnickminerios.com.br/produto/brita-zero/>. Acesso em: 25 de novembro de 2024.

SANTOS, C. R., **Estudo da utilização de rejeito de carvão mineral na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural**. 2012. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, J. R. M. **Reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado com uma solução híbrida de CFRP**. 2017. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho Escola de Engenharia, Braga, 2017.

SIMONETTI, C. **Análise teórico experimental da deformação instantânea e lenta de vigas de concreto auto-adensável**. 2008. Dissertação de Mestrado (Pós Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2008. 148 p.