

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

AMANDA TAFURI COSTA

**Concreto com agregado reciclado de concreto reforçado com fibras de aço: da
caracterização do material à aplicação estrutural**

São Paulo

2023

AMANDA TAFURI COSTA

**Concreto com agregado reciclado de concreto reforçado com fibras de
aço: da caracterização do material à aplicação estrutural**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador: Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo.

Coorientador: Prof. Dr. Luís Antônio Guimarães Bitencourt Júnior.

SÃO PAULO

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Costa, Amanda Tafuri

Concreto com agregado reciclado de concreto reforçado com fibras de aço: da caracterização do material à aplicação estrutural / A. T. Costa -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

89 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Agregado Reciclado 2.Fibras de aço 3.Comportamento mecânico
4.Resistência pós-fissuração 5.Elementos estruturais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Rafael e aos meus pais Avelino e Rose, por todo o apoio em minhas jornadas e por todo amor e suporte dedicado a mim e às minhas escolhas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo, pelo conhecimento, carinho e paciência dedicados na minha formação como pesquisadora e ser humano. Sou grata por ter me acolhido como filha acadêmica.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luis Antonio Guimarães Bitencourt Júnior, pelos ensinamentos, desafios propostos e ao seu apoio constante, que despertaram em mim a empolgação pela modelagem numérica.

Aos membros da banca Luísa Andréia Gachet e Daniel de Lima Araújo pela ajuda no aperfeiçoamento dessa pesquisa.

Aos funcionários do Hall Tecnológico Renata, Jéssica, Adilson, Mario, Rui, e em especial ao Gilvan por toda ajuda que possibilitou a realização desse estudo.

Aos meus amigos e colegas, em especial José Gabriel, Rafaela, Noemi e Priscila, por toda a assistência e momentos de descontração que deixaram essa jornada mais divertida e estimulante.

À Engemix pelo fornecimento do concreto que deu origem ao agregado reciclado.

À Carina e ao Laboratório de Minas pela possibilidade e ajuda na britagem do material.

Ao laboratório Evolução Engenharia e ao Guilherme pela possibilidade de realização dos ensaios de flexão.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido através do processo nº: 2020/14186-2.

RESUMO

Materiais como o concreto com agregado reciclado (CAR) estão sendo estudados devido à crescente necessidade de reduzir a exploração de recursos naturais e diminuir o volume de resíduos de concreto descartados em aterros. Porém, os agregados reciclados (AR) podem resultar em uma significativa redução de propriedades mecânicas do concreto devido a sua maior porosidade. Em paralelo, sabe-se que a utilização desse agregado em concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) não representam uma redução tão significativa das propriedades mecânicas na condição de pós-fissuração, e pode ajudar a viabilizar o material em aplicações específicas. A parametrização do comportamento do concreto com agregados reciclados reforçado com fibras de aço (CARRFA), segundo os critérios recentes de códigos de dimensionamento para fins estruturais, ainda não foi realizada. Nesse contexto, esta pesquisa realizou a caracterização do CARRFA com diferentes percentuais de substituição de agregados naturais por reciclados e diferentes teores de fibras de aço por meio de ensaios de flexão, de compressão axial, de módulo de elasticidade, massa específica, absorção de água e índice de vazios. Além disso, foram usados programas computacionais como uma ferramenta de extrapolação do comportamento e seus resultados foram comparados com os resultados experimentais. Foi observado que o uso de AR não influenciou na resistência residual de elementos estruturais de CARRFA quando sujeitos a flexão, mesmo com a redução das propriedades mecânicas do material como a resistência à compressão e massa específica. Os resultados experimentais e numéricos mostraram boa correlação entre si, ambos aplicados em um elemento estrutural fletido e demonstrando que o CARRFA apresenta vantagens no dimensionamento tanto no Estado Limite Último (ELU) quanto no Estado Limite de Serviço (ELS) em relação ao concreto de referência.

Palavras-chave: agregado reciclado; fibras de aço; comportamento mecânico; resistência pós-fissuração; elementos estruturais.

ABSTRACT

Materials such as concrete with recycled aggregate (RAC) are being studied due to the increasing need to the exploitation of natural resources and reduce the volume of construction and demolition waste disposed of in landfills. However, the recycled aggregates show a reduction in mechanical properties due to its higher porosity. In parallel, it is known that the use of this aggregate in steel fiber reinforced concrete (SFRC) does not represent such a significant reduction of the mechanical properties in the post-cracking condition; moreover, it can help to make feasible the use of RAC in specific applications. The parameterization of the behavior of steel fibers-reinforced recycled coarse aggregates concrete (SFRCAC), according to the recent criteria of design codes for structural purposes, has not been carried out yet. In this context, the study aims to characterize the RAC with different percentages of substitution of natural aggregates for recycled ones and different contents of steel fibers by means of flexion tests (EN 14651), axial compression, modulus of elasticity and specific mass. Furthermore, computational programs were used as a behavior extrapolation tool and their results were compared to the experimental ones. Finally, a full-size beam was designed for each fiber and aggregate replacement ratio in both the Ultimate Limit State (ULS) and Service Limit State (SLS). It was observed that the use of AR did not influence the SFRCAC structural element residual resistance when subjected to bending, even reducing the mechanical properties of the material, such as compressive strength and specific mass. The experimental and numerical results showed good correlation between them, both applied in a beam and showing that the SFRCAC presents design advantages for both ULS and SLS when compared to the reference concrete.

Keywords: recycled aggregate; steel fibre; mechanical behaviour; post-cracking resistance, structural elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamentos pós-fissuração do CRF: (a) softening e (b) hardening	15
Figura 2: Curva Carga por CMOD	16
Figura 3: Leis constitutivas de pós-fissuração dos modelos para CRF:.....	17
Figura 4: Lei constitutiva linear pós-fissuração do CRF.....	18
Figura 5: Fragmentação de malha de elementos finitos: (a) processo e (b) modelo constitutivo.....	25
Figura 6: Geração das fibras em 3D (a), projetadas em 2D (b).....	27
Figura 7: Ilustração da ancoragem da fibra.....	30
Figura 8: Processo de obtenção do agregado reciclado: (a) moldagem em placa, (b) quebra inicial com martetele, (c) britador de mandíbula primário e (d) secundário e (e) peneirador.....	31
Figura 9: Abatimento do concreto sem coesão por falta de argamassa (a) e do concreto no teor ótimo de argamassa (b).....	32
Figura 10: Exemplares retificados do concreto base, com AN e com 20% e 50% de AR.....	34
Figura 11: Equipamentos para os ensaios de caracterização: resistência à compressão e módulo de elasticidade (a) e ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água (b).....	35
Figura 12: Esquema de ensaio à flexão em três pontos	36
Figura 13: Equipamento de ensaio à flexão de três pontos.	36
Figura 14: Ensaio indutivo: equipamento (a) e corpo de prova centralizado na bobina (b).....	37
Figura 15: Posição de uma fibra dentro de um campo magnético e adoção de três eixos genéricos.....	38
Figura 16: Corte dos extremos da viga para realização do ensaio indutivo.	38
Figura 17: Cubos de isopor para calibração do ensaio indutivo.	39
Figura 18: Retas de calibração do ensaio indutivo.	40
Figura 19: Modelo numérico desenvolvido para simulação do ensaio de flexão em três pontos para o teor de 20 kg/m ³ de fibras de aço.	41
Figura 20: Fluxo do processo de simulação via método dos elementos finitos usando a metodologia proposta por Bitencourt Jr. (2015).....	43

Figura 21: Correlação entre a resistência à compressão e relação a/c para M=4, 5 e 6.....	44
Figura 22: Correlação entre a relação água/materiais secos e abatimento para M=4, 5 e 6.....	44
Figura 23: Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados.	46
Figura 24: Abatimento médio das amostras.....	48
Figura 25: Resistência média à compressão das amostras por teor de AR.....	50
Figura 26 : Módulo de elasticidade médio das amostras por teor de AR.....	51
Figura 27: Massa específica média das amostras por teor de AR.....	52
Figura 28: Caracterização dos concretos em relação a absorção de água (a) e índice de vazios (b) médio das amostras.	52
Figura 29: Valores médios da quantidade de fibras.	53
Figura 30: Contribuição média das fibras por eixo do sistema de referência adotado no ensaio indutivo.	54
Figura 31: Carga por CMOD para os concretos: (a) sem adição de fibras, (b) 20 kg/m ³ de fibras de aço, (c) 35 kg/m ³ de fibras de aço e (d) 50 kg/m ³ de fibras de aço.....	55
Figura 32: Relação linear entre as tensões residuais e a quantidade de fibras adicionada.....	57
Figura 33: Curvas de Carga vs. CMOD para o CAN (a) com o teor de 20kg/m ³ de fibras em 4 distribuições de fibras (b) e distribuições recalibradas, (c) e os teores de 35kg/m ³ e (d) 50kg/m ³	59
Figura 34: Carga por CMOD do CAR com 20% de AR (a) com o teor de 20kg/m ³ de fibras em 4 distribuições e (b) distribuições recalibradas, e (c) com teores de 35kg/m ³ e (d) 50kg/m ³	60
Figura 35: Carga por CMOD do CAR com 50% de AR (a) com o teor de 20kg/m ³ de fibras em 4 distribuições e (b) distribuições recalibradas, e (c) com teores de 35kg/m ³ e (d) 50kg/m ³	61
Figura 36: Vigas de concreto com 20% de AR para um CMOD=2,5mm e com teores de fibra de aço de (a) 20 kg/m ³ , (b) 35 kg/m ³ e (c) 50 kg/m ³	62
Figura 37: Modelo constitutivo rígido plástico para os valores de (a) AN, (b) 20% de AR, (c) 50% de AR.....	65

Figura 38: Modelo constitutivo linear para os valores de (a) AN, (b) 20% de AR, (c) 50% de AR.	65
Figura 39: Resistência à tração no ELS.	66
Figura 40: Resistência à tração no ELU.	66
Figura 41: Geometria da viga estudada.	67
Figura 42: Diagramas de cortante e momento da viga estudada.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio e número de corpos de prova produzidos.	29
Tabela 2: Dosagem dos concretos para os diferentes teores de AR.....	45
Tabela 3: Propriedades dos agregados miúdos e graúdos.	46
Tabela 4: Informações granulométricas dos agregados graúdos e miúdos utilizados.	46
Tabela 5: Massa unitária agregados graúdo.....	47
Tabela 6: Resultados médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados.....	49
Tabela 7: Valores de p da análise estatística.	50
Tabela 8: Valores de p para a resistência limite e as resistências residuais.....	56
Tabela 9: Análise de variância de dois fatores para a resistência limite dos concretos.....	56
Tabela 10: Parâmetros materiais usados nos modelos numéricos.....	58
Tabela 11: Resistências limites e residuais obtidas experimentalmente e numericamente.	63
Tabela 12: Parâmetros de dimensionamento no ELS e ELU.....	64
Tabela 13: Resistência média, característica e módulo de elasticidade dos concretos.....	67
Tabela 14: Resultados da armadura longitudinal adotada.	69
Tabela 15: Resultados da armadura necessária para resistir a força cortante.	70
Tabela 16: Resultados de abertura de fissura e deflexão.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Agregado Natural
AR	Agregado Reciclado
ARCO	Agregado Reciclado de Concreto
CAN	Concreto com Agregado Natural
CAR	Concreto com Agregado Reciclado
CARRFA	Concreto com Agregado Reciclado Reforçado com Fibra de Aço
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement (abertura do entalhe à flexão)
CP	Corpo de Prova
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CP-V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
EFA	Elementos Finitos de Acoplamento
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	European Norm
<i>Fib</i>	Fédération Internationale du Béton
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
NBR	Norma Brasileira
RC	Resíduo de Concreto
RCD	Resíduo de Construção e Demolição

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	13
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO	13
2. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	15
2.1 USO DE FIBRAS EM CONCRETO	15
2.2 USO DO AGREGADO RECICLADO EM CONCRETOS	18
2.3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS	21
2.4 ESTRATÉGIAS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL	24
3. METODOLOGIA UTILIZADA	28
3.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES	29
3.2 ESTUDO DE DOSAGEM	31
3.3 MOLDAGEM E CURA	33
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	35
3.6 ENSAIO INDUTIVO	37
3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE DOSAGEM	44
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	45
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	48
4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO	54
4.5 MODELAGEM NUMÉRICA	57
4.6 APLICAÇÃO DO CARRFA EM UMA VIGA	67
5. CONCLUSÕES	74
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A	85
APÊNDICE B	88

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material estrutural amplamente utilizado na construção civil devido sua resistência à água, disponibilidade e baixo custo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Porém, preocupações ambientais a respeito desse assunto ganharam atenção na última década com a geração de milhões de toneladas de resíduos de concreto anualmente (MENEGAKI; DAMINGOS, 2018; WANG *et al.*, 2021). No Brasil, os aterros sanitários estão chegando próximo de atingir sua capacidade máxima e isso gera um aumento de descartes em pontos clandestinos, sendo que cerca de apenas 59,5 % dos resíduos sólidos municipais foram devidamente descartados em 2019 (ABRELP, 2021). A estimativa é de que aproximadamente 1,05 milhões de metros cúbicos de resíduo sejam produzidos por ano no Brasil apenas nas usinas dosadoras de concreto (VIEIRA *et al.*, 2019), um valor que não pode ser negligenciado.

Nesse contexto, o agregado graúdo desempenha um papel importante, já que constitui entre 60 % e 80 % do volume do concreto, influenciando significativamente a sua durabilidade e propriedades mecânicas (OUYANG, 2023). O agregado natural é um material de natureza não renovável, altamente consumido pelo setor de construção e já apresenta esgotamentos locais devido à alta extração (BAUER, 2019). Além disso, segundo Langer e Arbogast (2022), sua extração e produção resultam em impactos ambientais significativos.

A exploração de materiais alternativos como o agregado reciclado (AR) de resíduo de concreto tem se apresentado como uma solução promissora. Essa abordagem reduz a demanda por recursos naturais, minimiza a geração de resíduo e mitiga a pegada de carbono associada a produção e transporte do agregado (NGUYEN *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2021). Marinkovic (2023) destaca que a reciclagem também ajuda a reduzir os impactos sociais e econômicos no contexto da economia circular. Apesar dessa conscientização atual, é importante destacar que enquanto nos países desenvolvidos a taxa de reciclagem é elevada, atingindo muitas vezes valores maiores que 70 % (ULUBEYLI, 2017), no Brasil a taxa de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos ainda é baixa (IPEA, 2017), evidenciando a necessidade de se aumentar a taxa de reciclagem para que o país possa obter um ganho ambiental.

Atualmente, diversos pesquisadores vêm investigando a influência do agregado reciclado na resistência mecânica (ELAVARASAN; POORNIMA; PRIYA, 2022; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018) e durabilidade (GAO *et al.*, 2020; KAPLAN *et al.*, 2021) do concreto, além de avaliar alternativas para potencializar os resultados em aplicações estruturais específicas (ANIKE *et al.*, 2022; CHAN *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020). Recentemente, com a publicação dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pelas Nações Unidas, tem aumentado ainda mais o interesse pelo tema no meio científico, o qual tem relação direta principalmente com os ODS nº 2 “Indústria, Inovação e Infraestrutura”, nº 11 “Cidades e Comunidades Sustentáveis” e nº 12 “Consumo e Produção Responsáveis (UNITED NATION, 2023).

Uma alternativa recente explorada por muitos pesquisadores tem sido a substituição parcial ou total do agregado natural por reciclado na produção de concretos visando sua aplicação estrutural (ANIKE *et al.* 2022; LI *et al.* 2020; CHAN *et al.* 2019). Destaca-se no cenário nacional que após a atualização recente da ABNT NBR15116 (2021), é permitido atualmente a produção de concreto com agregado reciclado para uso estrutural em uma quantidade limitada a 20 % da massa total de agregado. Entretanto, é importante destacar que ainda há dificuldade de incluir esse material com finalidades estruturais na indústria da construção, dentre alguns motivos, algumas pesquisas indicam que o CAR normalmente apresenta propriedades mecânicas e de durabilidade inferiores ao concreto com agregado natural (KAPLAN *et al.* 2021; ALI *et al.* 2021). Isso é devido principalmente a sua menor densidade, maior porosidade, maior absorção de água, e presença de microfissuras na argamassa antiga e zona de transição interfacial (TAM *et al.*, 2021). Nesse sentido, muitos pesquisadores propuseram alternativas para aprimorar o CAR em termos de resistência mecânica e durabilidade (ANIKE *et al.* 2022; NGUYEN *et al.* 2021; KAPLAN *et al.* 2021). WANG *et al.* (2021) divide essas alternativas em três categorias: (i) redução da porosidade do agregado reciclado; (ii) redução da camada aderida de argamassa antiga na superfície do agregado; (iii) e melhoria das propriedades sem modificação do agregado, como por exemplo, adição de fibras como reforço.

Em paralelo, a norma brasileira publicada recentemente ABNT NBR16935 (2021), prevê o uso do concreto reforçado com fibras (CRF) para aplicações estruturais desde que o compósito atenda aos requisitos mínimos de comportamento pós-fissuração. Neste sentido, destaca-se o uso do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), uma vez que as fibras de aço por possuírem alto módulo de elasticidade, alta resistência mecânica e capacidade de deformação, conseguem atuar como pontes de transferência de tensão após a fissuração da matriz, mantendo os desempenhos estruturais mínimos esperados. Para elementos estruturais fletidos, como as vigas por exemplo, mesmo concretos reforçados com um baixo teor de fibras de aço (inferior a 1% em volume), os elementos estruturais de CRFA têm apresentado comportamento satisfatório em estado limite de serviço (ELS), e estado limite último (ELU) (TRINDADE; BITENCOURT; MANZOLI, 2020), podendo até mesmo substituir parcialmente ou totalmente os estribos usualmente empregados para resistir aos esforços de cisalhamento.

Com base no que foi exposto até aqui, fica evidente que a combinação de CAR e fibras de aço é promissora. A combinação pode impulsionar o uso de um material estrutural que possui um apelo ambiental, social e econômico a partir do uso do agregado reciclado do concreto. Além disso, proporciona a produção de estruturas de concreto mais seguras a partir da adição de fibras de aço, uma vez que as fibras aumentam a capacidade de deformação dos elementos estruturais quando comparados aos elementos estruturais convencionais de concreto armado.

Neste sentido, esta pesquisa visa realizar uma caracterização pós-fissuração do CARRFA a fim de avaliar o seu uso como material estrutural. Desta forma, o agregado reciclado foi produzido a partir de um concreto de resistência mecânica convencional, o qual, assim como o concreto final, foi caracterizado através de ensaios de flexão, compressão, módulo de elasticidade, índice de vazios, absorção de água e massa específica. Foram produzidos CARRFA considerando 20 % e 50 % de substituição de agregado natural por agregado reciclado, e três teores de fibras de aço: 20, 35 e 50 kg/m³. Os resultados de referência foram os resultados obtidos a partir do concreto com agregado natural reforçado com os três teores de fibras de aço avaliadas. Um estudo numérico

também foi realizado via método dos elementos finitos empregando um modelo com representação discreta e explícita das fibras de aço proposto por Bitencourt Jr. (2015). Este modelo foi calibrado a partir dos ensaios de caracterização do material, e pode ser utilizado para obtenção de parâmetros pós-fissuração visando avaliar outras misturas com diferentes teores de fibras de aço. Por fim, os parâmetros obtidos são empregados no dimensionamento de uma viga de concreto armado com CARRFA (CA-CARRFA) visando avaliar seu comportamento em ELS e ELU.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do projeto é obter parâmetros pós-fissuração do CARRFA visando sua aplicação como material estrutural. Para isso lista-se os seguintes objetivos específicos:

- i) Produzir os agregados reciclados a partir de um concreto com resistência convencional e realizar uma caracterização rigorosa de suas propriedades mecânicas e físicas;
- ii) Obter parâmetros pós-fissuração do CARRFA para dois teores de substituição de agregado natural por reciclado (20% e 50%) e três teores de adição de fibras (20, 35 e 50 kg/m³).
- iii) Avaliar os resultados obtidos no atendimento aos requisitos da ABNT NBR 16935 (2021) para seu emprego como material estrutural.
- iv) Obter os parâmetros pós-fissuração das misturas estudadas a partir de simulação computacional, comparando com os resultados experimentais.
- v) Avaliar a aplicabilidade dos parâmetros de pós-fissuração obtidos experimentalmente e numericamente para o projeto de uma viga de CARRFA.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

No capítulo 1 é apresentada a introdução da pesquisa, abordando a motivação e a justificativa desse estudo, bem como os objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 encontra-se uma revisão bibliográfica a respeito do concreto com agregado graúdo reciclado, abordando a sua reciclagem, estratégias de utilização e recomendações normativas para sua utilização em aplicação estrutural. Também abrange detalhes da norma para a utilização do concreto com fibras para fins estruturais e suas características e propriedades quando utilizado juntamente com o agregado reciclado. Além de relatar aquilo que tem sido utilizado em termos de simulação computacional, tanto para o concreto com agregado reciclado quanto para o concreto reforçado com fibras.

O capítulo 3 descreve a metodologia experimental adotada para este estudo, abrangendo a escolha dos materiais e dos ensaios realizados tanto para a caracterização das matérias-primas quanto para a caracterização dos concretos estudados. Descreve também a metodologia da simulação numérica utilizada nesse estudo.

No capítulo 4 apresentam-se as análises dos resultados, abrangendo a caracterização dos concretos, seus resultados experimentais e numéricos e o dimensionamento de vigas em tamanho real.

O capítulo 5 apresentam-se as conclusões da pesquisa, obtidas a partir da análise dos resultados experimentais e numéricos em conjunto com a proposta de temas para futuras pesquisas.

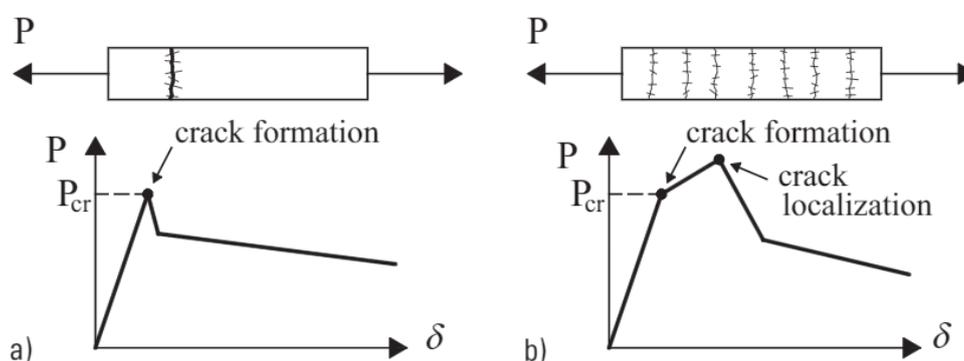
2. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

2.1 USO DE FIBRAS EM CONCRETO

O uso de fibras de aço no concreto vem sendo cada vez mais pesquisado e utilizado no cenário internacional para prevenir e retardar o crescimento de fissuras no concreto, aumentando a ductilidade e as propriedades mecânicas de pós-fissuração do material (ZHANG et al., 2023). No cenário nacional o aumento do interesse não é diferente. Recentemente houve a publicação da norma brasileira NBR16935 (2021) que prevê a utilização do CRF para aplicações estruturais.

A norma brasileira ABNT NBR16935 (2021) considera dois comportamentos básicos em função da capacidade de reforço pós-fissuração. O primeiro é chamado de *softening* e ocorre quando o volume de fibras está abaixo do volume crítico, ou seja, a resistência pós-fissuração do material é inferior a resistência da matriz. Então, a capacidade de absorção de esforços diminui após o surgimento da fissura. Já o segundo comportamento é chamado de *hardening* e ocorre quando o volume de fibras é superior ao volume crítico. Neste caso, a capacidade que o compósito tem de resistir aos esforços de tração aumenta com o início da fissuração até o momento em que ocorre uma concentração de múltiplas fissuras. Ambos os comportamentos estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1: Comportamentos pós-fissuração do CRF: (a) softening e (b) hardening



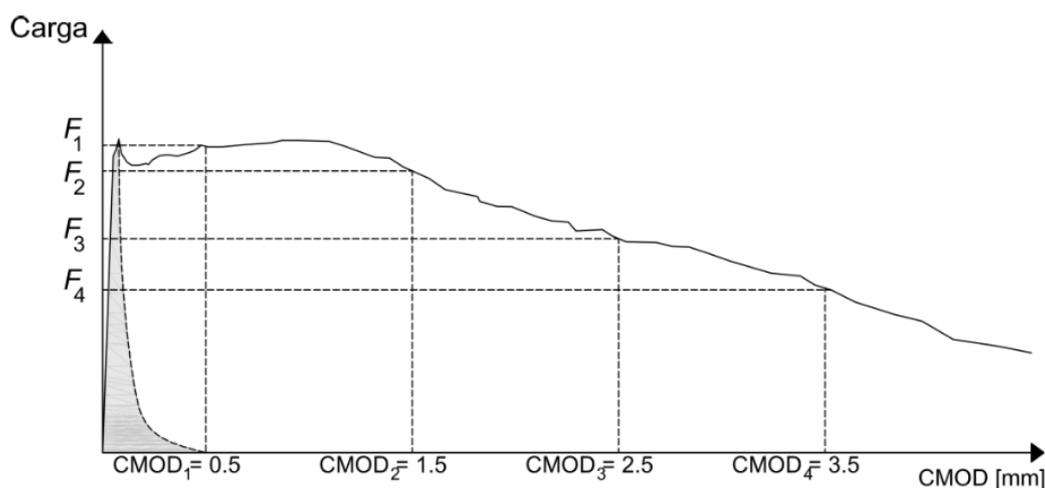
Fonte: DI PRISCO, COLOMBO e DOZIO (2013).

Como acontece nos compósitos, o método de ensaio influencia o comportamento do material na ruptura, podendo alterá-lo de *softening* para *hardening* quando trocamos ensaio de tração direta para ensaio de flexão, por

exemplo (DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Com isso é necessário padronizar um método de ensaio para ser o representativo e totalmente compatível com o modelo de dimensionamento (FIGUEIREDO, 2014). No desenvolvimento da norma brasileira NBR16935 (2021) o método europeu de flexão em 3 pontos descrito na norma EN14651 (2005) foi utilizado como referência.

A partir do ensaio descrito pela norma EN14651 (2005) pode-se plotar curvas de Carga vs. CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) conforme ilustra a Figura 2. Com base nessas curvas, são calculados quatro valores de resistências residuais ($f_{R1}, f_{R2}, f_{R3}, f_{R4}$), correspondentes aos valores de quatro níveis de CMOD = 0,5; 1,5; 2,5 e 3,5mm, respectivamente), os quais são utilizados para verificar se o material atende aos requisitos de projeto para ser empregado como material estrutural.

Figura 2: Curva Carga por CMOD



Fonte: NBR16935 (2021).

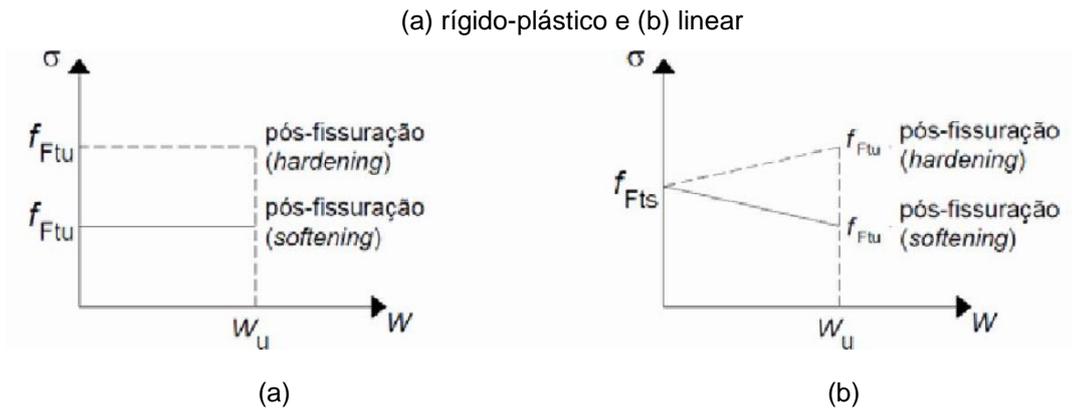
De acordo com a NBR16935 (2021), o CRF pode substituir totalmente ou parcialmente os reforços convencionais de barras de aço em elementos estruturais dimensionados no estado-limite-último desde que respeitem as relações das equações 1 e 2:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} \geq 0,4 \quad (1)$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \geq 0,5 \quad (2)$$

A norma prevê ainda duas hipóteses de leis constitutivas que relacionam a tensão por abertura de fissura (w): o modelo rígido-plástico e o modelo linear (Figura 3). Nestes modelos, f_{Fts} representa a resistência à tração direta em serviço do CRF e f_{Ftu} representa a resistência à tração direta última do CRF.

Figura 3: Leis constitutivas de pós-fissuração dos modelos para CRF:



Fonte: NBR16935 (2021).

No modelo rígido-plástico o valor de f_{Ftu} pode ser obtido por meio da equação 3:

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (3)$$

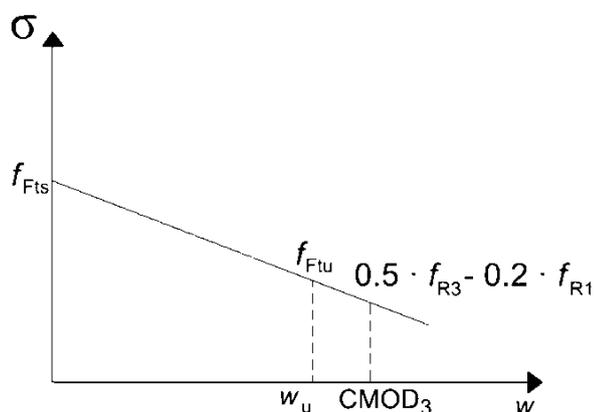
Já no modelo linear os valores de f_{Fts} e f_{Ftu} podem ser obtidos por meio das equações 4 e 5, onde w_u é a abertura de fissura última para o valor de CMOD considerada no projeto, expressa em milímetros.

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (4)$$

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

A lei constitutiva linear pós-fissuração do CRF que permite a obtenção do f_{Ftu} , quando $CMOD_3$ é diferente de w_u , é dada por uma reta com o intervalo das abscissas entre o $CMOD_1$ e o $CMOD_3$ (Figura 4). Sendo que no modelo linear, os valores-limite de CMOD de f_{Ftu} e f_{Fts} são respectivamente 2,5 mm e 1,5 mm.

Figura 4: Lei constitutiva linear pós-fissuração do CRF



Fonte: NBR16935 (2021).

2.2 USO DO AGREGADO RECICLADO EM CONCRETOS

Uma das estratégias de viabilização do CAR é a seleção de agregados reciclados mais resistentes desde a origem desse material (NAZARIMOFRAD *et al.*, 2017), como é o caso do resíduo de concreto (RC), sendo um resíduo que apresenta menor porosidade, boa homogeneidade das propriedades físicas e mecânicas e maior potencial de utilização em elementos estruturais quando comparado a outros resíduos de construção e demolição. São exemplos de RC os concretos retornados às usinas dosadoras ou resíduos de elementos estruturais compostos unicamente por concreto, como elementos provenientes da indústria de pré-moldados ou de demolição.

Entretanto, devido à argamassa aderida aos agregados naturais (AN), os agregados graúdos de concreto reciclado ainda possuem uma maior porosidade quando comparados aos agregados de rochas britadas, apresentando uma menor resistência mecânica (SENARATNE *et al.*, 2016).

Por conta disso, alguns estudos empregam processos mecânicos para remover parte da argamassa aderida ao agregado natural (NAGATAKIL *et al.*, 2004) e, com isso, evitar o aumento da porosidade global do CAR. Por outro lado, a literatura aponta que estes procedimentos de melhoria da qualidade do agregado reciclado podem possuir um alto consumo de energia, aumentando o custo do produto, e podendo apresentar impactos ambientais negativos quando energia não-renovável é utilizada nesse procedimento, através da liberação de CO_2 (SANTOS *et al.*, 2017). Além dos processos mecânicos, são estudadas

outras técnicas para melhorar as propriedades do AR como, por exemplo, o estudo de Tam, Tam e Le (2007) que avaliou a pré-imersão dos agregados reciclados em soluções ácidas ou o estudo de Zega e Di Maio (2009) que avalia a exposição dos agregados reciclados em altas temperaturas. Entretanto, o uso de tratamentos pode significar um aumento no custo do concreto (ZHANG *et al.*, 2019) e apresentar desvantagens econômicas quando comparados ao uso do agregado natural.

Outros estudos abordam o aumento do consumo de cimento dos concretos produzidos com agregado reciclado, possibilitando o aumento na resistência mecânica do material. No entanto, o consumo do cimento acarreta impactos ambientais negativos como a elevação no nível de emissões de CO_2 por metro cúbico de material utilizado (DAMINELLI *et al.*, 2010) e ocasiona um aumento no custo. De acordo com Marinkovic *et al.* (2017), concretos com AR devem possuir a mesma relação água/cimento que os concretos com agregado natural como um sinal de uma melhor atuação de preservação ambiental, sendo que os possíveis problemas de trabalhabilidade devem ser corrigidos com plastificantes de modo a torná-los viáveis.

Pesquisas recentes estão empregando o AR em concretos reforçados com fibras de aço, já que as fibras contribuem para a melhora do comportamento do material quando submetido a esforços de tração ou flexão (FIGUEIREDO, 2011). Esse reforço é capaz também de aumentar a capacidade de absorção de energia, a resistência ao impacto, à fadiga e à abrasão do material (CHAN; LIU; GALO BARDES, 2020), tornando interessante a utilização do CAR reforçado com fibras em determinadas aplicações, como em elementos estruturais armados predominantemente submetidos a esforços de flexão, onde a perda de resistência à compressão não configura um grande prejuízo para a capacidade portante do elemento estrutural, já que nesta condição a principal responsabilidade estrutural é do sistema de reforço (LI, 2009).

No Brasil, a norma ABNT NBR15116 foi atualizada em 2021, prevendo a possibilidade de utilização de agregado reciclado em concretos com função estrutural. Dentre os requisitos para essa utilização está a classe do resíduo, sendo que “resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de

edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto” se enquadra na classe A exigida para tal.

A norma utiliza ainda três subclasses para os agregados reciclados, sendo que apenas o agregado reciclado de concreto (ARCO) pode ser utilizado em compósitos com função estrutural, desde que a substituição do agregado natural por reciclado esteja limitada a 20 % da massa de agregados totais. Além disso, o concreto deve ser das classes de agressividade I e II da ABNT NBR6118:2014. Já as demais subclasses podem ser utilizadas, em teores de substituição de agregado natural por reciclado de até 100 %, em concretos de cimento Portland para usos não estruturais. A norma brasileira, diferentemente das recomendações internacionais, não determina uma densidade mínima ao agregado, porém impõe um limite de absorção de água menor que 7 % para a subclasse ARCO em produtos e compósitos cimentícios.

Em contraste com o Brasil, países como Noruega, Suíça e Dinamarca, utilizam há algum tempo concretos com agregados reciclados e inclusive possuem normas que viabilizam sua utilização estrutural com substituição total dos agregados graúdos (DE BRITO; SAIKIA, 2013). Embora esteja ocorrendo um avanço normativo no Brasil em relação ao uso de agregados reciclados, ainda são necessários estudos que caracterizem o material para que um maior conhecimento técnico científico possa eventualmente validar a utilização de maiores teores de substituição e/ou considerar a utilização de fibras de aço para atenuar os atuais requisitos mínimos nacionais.

Em paralelo, a reciclagem só se torna ambientalmente positiva se os recursos utilizados durante todo o processo de coleta, seleção, transporte e tratamento do resíduo representarem um impacto ambiental menor do que aquele causado na obtenção do material virgem.

Nesse sentido, como o transporte do agregado natural é responsável por um terço de toda a emissão de CO₂ gerado no processo de utilização do agregado natural (SCRIVENER, JOHN e GARTNER, 2018), o uso de agregado de concretos se torna interessante já que, diferentemente do agregado natural que vem de regiões mais afastadas, o agregado reciclado pode ser produzido nos próprios centros urbanos, utilizando uma boa gestão de resíduos para que a minimização do deslocamento do agregado reduza o custo do transporte e a

emissão de CO₂ gerada pela queima de combustível. Além disso, o custo do transporte do agregado natural chega a ser superior ao custo da produção do agregado em si (BAUER, 2019), tornando interessante a possibilidade de o local de geração do agregado ser próximo ao local de aplicação do concreto.

Um estudo desenvolvido por Vieira *et al.* (2019) demonstrou que o volume de resíduos gerado pela produção de concreto em usinas dosadoras de concreto corresponde a aproximadamente 3 % do volume de concreto produzido, estimando uma quantidade maior que 1 milhão de metros cúbicos de resíduo produzido anualmente. Embora a quantidade de resíduo represente aproximadamente 5 % da demanda de agregado gráudo necessária anualmente, esse valor não pode ser negligenciado. O mesmo raciocínio de economia circular pode ser empregado em indústrias como a de pré-moldado de concretos. Revilla-Cuesta *et al.* (2022) verificaram que o agregado gráudo reciclado pode ser facilmente produzido na própria indústria com os resíduos de concreto ali gerados, ocasionando uma redução nos custos de até 5 % na planta estudada.

Dessa forma, a reciclagem de resíduos de concreto com a produção do agregado reciclado na própria indústria pode reduzir os custos financeiros e ambientais com a otimização da logística, podendo tornar o preço por tonelada do AR menor do que o preço por tonelada do AN (SILVA, BRITO e DHIR, 2014), pois o sistema produtivo pode ser organizado de maneira que a geração de resíduo se torne parte da matéria-prima de sua própria empresa. Além disso, essa reciclagem in loco requer menos energia quando comparada a reciclagem do resíduo de demolição que precisam passar eventualmente pelo processo de descontaminação (SCRIVENER, JOHN e GARTNER, 2018).

2.3 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

A densidade do agregado influencia mais significativamente o comportamento do concreto quando sua argamassa possui relações água/cimento menores, ou seja, quando possuem maior resistência mecânica, pois nesses casos a porosidade da matriz cimentícia é menor que a porosidade do agregado (FIGUEIREDO *et al.*, 2018) e o agregado representa o elo fraco do compósito. Comportamentos similares foram encontrados no estudo de Gimenes

et al. (2020), que verificou através de modelos numéricos o desenvolvimento da fissura em vigas submetidas à flexão em três diferentes valores de resistência à compressão característica (f_{ck}): 18 MPa, 37 MPa e 48 MPa. Enquanto na viga de 18 MPa não foram observadas fissuras atravessando o agregado, na viga de 37 MPa observou-se fissuras atravessando o agregado apenas no concreto com agregado reciclado. Já nas vigas de 48 MPa as fissuras atravessaram ambos os agregados. Esse estudo demonstra por meio de modelagem numérica que o uso de agregado reciclado pode influenciar no padrão de fissuração do concreto.

Além disso, o uso de agregado reciclado reduz as propriedades mecânicas apenas quando a origem do agregado reciclado possui menor densidade do que a matriz do concreto que ele será introduzido. Andreu *et al.* (2013) analisaram as propriedades mecânicas de concretos cujos agregados vieram de concretos de alto desempenho (60 MPa e 100 MPa), em teores de substituição de 20 %, 50 % e 100 %, observando que devido à alta qualidade da argamassa ligada a esse agregado, o CAR resultante apresentou desempenho igual ou superior ao concreto convencional. Esse comportamento ocorre, pois, em concretos de alto desempenho a porosidade da pasta pode ser similar a porosidade do agregado natural. O mesmo ocorre no estudo de Furian *et al.* (2022) onde o uso de agregado reciclado não alterou de maneira significativa a resistência a tração na flexão, já que o concreto que deu origem ao agregado reciclado possuía uma resistência à compressão característica superior ao concreto final.

Já a respeito da adição de fibras, um dos principais efeitos esperados no concreto é o aumento da resistência residual do material quando sujeito à esforços de tração/flexão, pois as fibras localizadas nas fissuras atuam como uma ponte de transferência de tensões entre as faces das fissuras, evitando tensões localizadas e, conseqüentemente, aumentando a capacidade do material em absorver energia (FIGUEIREDO; MONTE; BITENCOURT, 2022). Outro efeito esperado ao adicionar as fibras é a redução da abertura de fissuras, pois como em estruturas de concreto fletidas o principal sistema de reforço são as barras de aço, as fibras atuam como um reforçador do concreto a partir de sua argamassa. De acordo com Gao *et al.*, (2020) e Li *et al.* (2020), a redução da abertura de fissuras prolonga a vida útil do sistema pelo aumento da

durabilidade do material até uma adição aproximada de 1,5 % de fibras em volume.

Embora para volumes de fibras de até 0,5 % em volume o aumento do pico da resistência à flexão não seja perceptível (GAO; ZHANG, 2018), para maiores quantidades de fibras de aço, as fibras não somente promovem uma resistência residual do concreto, como também podem aumentar a força limite de proporcionalidade (f_L) de modo que o uso de fibras permita que o CAR possua um comportamento à flexão igual ou superior ao do concreto com agregado natural sem fibras (CAN).

Elavarasan, Poornima e Priya (2022) estudaram concretos com 50 % e 100 % de teor de substituição e adição de fibras em até 1,5 % em volume, notando um aumento na resistência à flexão conforme aumentou-se o teor de fibras, sendo que o concreto com 50 % de substituição ultrapassou o CAN quando o teor máximo de fibras foi adicionado. Kaplan *et al.* (2021) também observaram resultados similares para um CAR com 50 % de substituição e com um menor volume de fibras, de 1 % em volume. Além disso, Ali *et al.* (2021) observaram que uma adição de fibras de aço na faixa de 0,5 a 1 % em volume aumenta a resistência à flexão entre 45 % e 53 %. Kang *et al.* (2017) chegaram a estimar um teor ótimo de fibras de aço em vigas de CARRFA para que seu desempenho seja equivalente à mesma viga de CAN. Por último, Anike *et al.* (2022) e Chan *et al.* (2019) observaram que o aumento da resistência mecânica à flexão pelas fibras ocorre de maneira mais intensa em CAR do que em CAN. Isso ocorre possivelmente pois no CAR a presença de fibras altera o caminho de fissuração, gerando dificuldades de propagação do dano e deixando a superfície de fratura mais tortuosa. Com o aumento da área de fratura, aumenta-se também a resistência à flexão. Já no concreto com agregado natural a superfície de fratura já é tortuosa mesmo sem a adição de fibras, devido a tendência da fratura em contornar o agregado natural (PIETRA, 2005)

Poucos estudos avaliaram não somente o comportamento do agregado reciclado, mas também a aplicação desse material em elementos estruturais em tamanho real, como vigas. Li *et al.* (2020) estudaram vigas de CARRFA reforçadas com barras de aço por meio de ensaios de flexão de 4 pontos, observando que a adição de fibras causa um maior aumento na resistência à

fissuração do que na capacidade de carga da viga. Entretanto, esses estudos não utilizam as normas brasileiras para caracterização do CRF e alguns estudos utilizam agregado miúdo reciclado junto com o graúdo (ANIKE *et al.* 2022; CHAN *et al.* 2019), dificultando a separação da influência de cada componente. Portanto, apesar dos resultados promissores em combinar agregado reciclado com fibras de aço no concreto, uma caracterização do comportamento pós fissuração do material é necessária para o uso do CARRFA como material estrutural.

2.4 ESTRATÉGIAS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

A simulação computacional do concreto apresenta vários desafios, entre os quais, a representação distinta dos comportamentos à tração e compressão do material, e o complexo fenômeno de formação e propagação de fissuras. Atualmente, há na literatura diversos métodos numéricos disponíveis para simular o comportamento mecânico do concreto, contudo, o método dos elementos finitos tem se mostrado o mais atrativo e vem sendo largamente aplicado, tanto no meio acadêmico/científico, quanto na indústria, principalmente devido a sua simplicidade e capacidade de representação dos processos de falha.

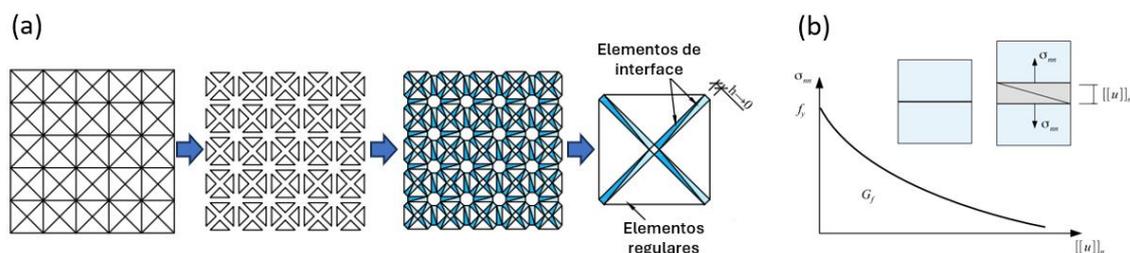
Em geral, os processos de falha são representados empregando abordagens contínuas ou descontínuas. A respeito dos modelos contínuos pode-se destacar os modelos baseados na mecânica do dano, como o modelo de dano de duas variáveis escalares proposto por Cevera, Oliver e Manzoli (1996), e os modelos de fissura distribuída (DE BORST *et al.*, 2004). Já dentro dos modelos descontínuos se destacam o Abordagem Descontinua Forte Contínua (em língua inglesa *Continuum Strong Discontinuity Approach* - CSDA) (OLIVER *et al.*, 2008), Descontinuidade Forte Incorporada (em língua inglesa *Embedded Strong Discontinuities* - E-FEM) (OLIVER; HUESPE, 2004), Modelo de Interface com Espessura Nula (em língua inglesa *zero-thickness interface model*) (LÓPEZ; CAROL; AGUADO, 2008), e o modelo de fragmentação de malhas de elementos finitos (MANZOLI *et al.*, 2016).

Recentemente, o modelo de fragmentação de malha de elementos finitos apresentou resultados promissores para simulação de problemas com múltiplas

fissuras, incluindo o processo de falha em CRF (BITENCOURT, 2015). Nesse modelo, são inseridos elementos finitos de interface com alta razão de aspecto entre os elementos da malha original, os quais irão definir as possíveis trajetórias de propagação de fissuras (Figura 5a). Quando comparados aos modelos discretos tradicionais, que utilizam elementos de interface com comportamento descrito por relações discretas do tipo tensão vs. abertura de fissura, os elementos de interface da técnica de fragmentação de malha são descritos por um comportamento dado por uma relação constitutiva do tipo tensão vs. deformação. Isto é permitido pois conforme demonstrado por (MANZOLI *et al.*, 2012), o campo de deformações do método é similar ao campo de deformações do CSDA, cuja descontinuidade é descrita por um modelo constitutivo contínuo. É importante destacar que, quando a altura desses elementos de interface com alta razão de aspecto tendem a zero, o seu comportamento é descrito automaticamente por uma relação tensão vs. abertura de fissura, conforme apresentado em Bitencourt, 2015.

Manzoli *et al.* (2016) empregaram um modelo constitutivo de dano à tração para representar o processo de formação e propagação de fissuras através da técnica de fragmentação de malhas, apresentando um comportamento elástico linear à tração até a resistência máxima f_t e após atingida a resistência máxima a fratura é descrita por uma lei exponencial calibrada utilizando a energia de fratura G_f (Figura 5b). Este modelo constitutivo é integrado usando uma técnica implícita-explicita (Impl-Ex) para evitar problemas de convergência numérica.

Figura 5: Fragmentação de malha de elementos finitos: (a) processo e (b) modelo constitutivo.



Fonte: Adaptado de Manzoli *et al.* (2016).

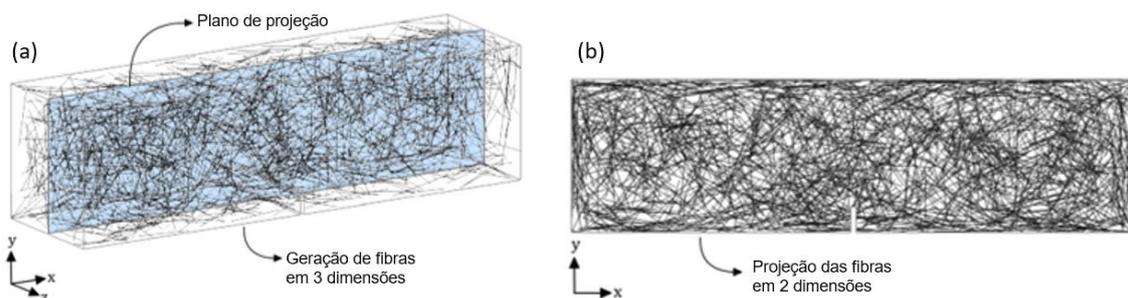
O modelo de fragmentação de malhas possui diversas aplicações para a simulação de concreto, inclusive com a criação de modelos em mesoescala para

a representação explícita do agregado em duas dimensões (GIMENES *et al.*, 2020, GIMENES *et al.*, 2023, RODRIGUES *et al.*, 2016, RODRIGUES *et al.*, 2018) e em três dimensões (RODRIGUES, MANZOLI, BITENCOURT, 2020).

Com o objetivo de evitar uma alta demanda de custos computacionais para resolver os problemas em mesoescala, modelos multiescala concorrentes têm sido propostos, os quais empregam modelos mesoescala apenas na região que apresentam fissuras (regiões com comportamento não linear), e modelos macroescala nas regiões com comportamento elástico linear (regiões íntegras) cujos parâmetros mecânicos dos materiais são adotados como parâmetros efetivos a partir das propriedades dos constituintes do compósito (RODRIGUES, MANZOLI, BITENCOURT, 2020). Nos últimos anos, modelos em mesoescala para o concreto têm sido desenvolvidos considerando uma representação explícita de agregados (RODRIGUES *et al.*, 2016) ou de fibras discretas (BITENCOURT *et al.*, 2019). Como estes modelos possuem uma maior demanda computacional para sua resolução, é comum que sejam combinados com modelos macroscópicos, resultando nos então conhecidos modelos multiescala.

As fibras e a sua interação com a matriz do concreto podem ser representadas de diversas formas, como por exemplo de maneira discreta e implícita através de forças aplicadas na malha do concreto (RADTKE; SIMONE; SLUYS, 2010) ou por meio de uma adaptação do modelo constitutivo utilizado para descrever o comportamento da formulação de fratura (ETSE; CAGGIANO; VRECH, 2012). Também podem ser representadas de maneira explícita usando elementos lineares e abordagens de incorporação dessas fibras na malha do concreto (BITENCOURT *et al.*, 2019). Nesse caso, embora as análises possam ser realizadas em duas dimensões para evitar um alto custo computacional, é interessante que as fibras inicialmente sejam geradas considerando as três dimensões da amostra, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Geração das fibras em 3D (a), projetadas em 2D (b)



Fonte: Adaptado de Trindade (2020).

Bitencourt *et al.* (2019) propuseram um modelo numérico para o concreto reforçado com fibras de aço, composto por três fases: concreto, fibras discretas e descontínuas, e a interação fibra-concreto. A vantagem desse modelo é a possibilidade dos fatores que influenciam o comportamento do material serem considerados separadamente, como a distribuição e orientação das fibras e a interação fibra-matriz, de modo que sejam uma variável de estudo que pode ser calibrada. Neste modelo, um programa para geração e distribuição das fibras de aço é empregado. Na sua forma padrão uma distribuição uniforme isotrópica randômica é adotada. Recentemente, modelos para representação dos ganchos das fibras de aço (MINEIRO *et al.*, 2022) e modelos de distribuição não uniformes de fibras (SILVA *et al.*, 2019) também foram desenvolvidos para este modelo numérico.

3. METODOLOGIA UTILIZADA

Inicialmente, este estudo produziu em condições controladas o agregado reciclado a partir de um concreto usinado recebido em estado fresco, para que o mesmo fosse caracterizado em relação à resistência à flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e índice de vazios antes de se tornar agregado. Foi solicitado um concreto de baixo f_{ck} , equivalente a 20 MPa, para que a condição crítica de maior dificuldade de viabilização tecnológica fosse estudada, onde incorpora-se um agregado de concreto de menor resistência em uma matriz de maior resistência mecânica (VIEIRA et al., 2020).

Para a definição do traço do concreto de referência, com 40 MPa, foi realizado um estudo de dosagem específico garantindo o atendimento deste requisito em conjunto com a trabalhabilidade medida pelo abatimento de tronco de cone. A partir deste concreto de referência procedeu-se à substituição do agregado graúdo por agregado reciclado mantendo as mesmas proporções volumétricas totais de modo a manter o mesmo teor de argamassa do material. Os teores de substituição escolhidos foram 20% e 50% em volume e o concreto sem substituição foi utilizado como referência (AN). Foram escolhidos esses teores de substituição por serem teores frequentemente utilizados na literatura, sendo que o teor de 20 % de substituição em volume corresponde a um teor de 8,3 % de substituição em massa de agregados totais, enquanto o teor de 50 % de substituição em volume corresponde a 21,4 % de substituição em massa de agregados totais, valor próximo do limite de 20 % permitido pela norma brasileira NBR15116 (2021) para esta condição. Para todas as matrizes produzidas, houve a adição de fibras de aço nos teores de 20 kg/m³, 35 kg/m³ e 50 kg/m³, correspondentes a 0,25 %, 0,44 % e 0,63 % em volume, além dos concretos sem fibras (SF) de referência para cada nível de incorporação de agregados reciclados. Essas quantidades foram escolhidas pois são quantidades consideradas de uso frequente nas aplicações de concreto com fibras (FIGUEIREDO, MONTE, BITENCOURT JR., 2022).

As diferentes misturas de concreto foram caracterizadas para verificação de seu potencial tecnológico em termos de atendimento aos requisitos estruturais bem como para a produção dos resultados a serem utilizados para calibração de

modelagem numérica. Ambos os resultados experimentais e numéricos foram utilizados para o dimensionamento de uma viga em condições reais.

3.1 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Na Tabela 1 estão listados os ensaios realizados bem como o número de corpos de prova utilizados. A seguir serão detalhadas as atividades.

Tabela 1: Ensaios e número de corpos de prova produzidos.

Concreto	Teor de fibras de aço (kg/m ³)	Número de corpos de prova			
		Flexão EN14651	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Massa específica
Base (20 MPa)	SF	3	5	3	2
AN (40 MPa)	SF	3	5	3	2
	20, 35, 50	4	5	3	2
20 % de AR	SF, 20, 35, 50	5	5	3	2
50 % de AR	SF, 20, 35, 50	5	5	3	2
Total		58	65	39	26

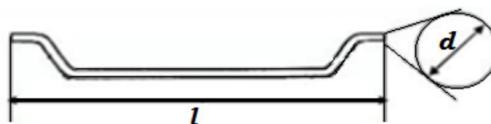
Cimento

O cimento CP-V ARI foi utilizado na execução dos concretos estudados, por se tratar de um cimento de ganho rápido de resistência e por ser amplamente utilizado na cidade de São Paulo.

Fibra

A fibra utilizada foi a fibra DRAMIX 80/60 BG, (fator de forma igual a 80 (l/d), comprimento da fibra igual a 60 mm e diâmetro igual a 0,75 mm) com ancoragem nas extremidades (Figura 7). De acordo com o fabricante, a fibra apresenta uma resistência a tração nominal de 1.225 N/mm², massa específica de 7,85 g/cm³, alongamento máximo menor que 4 %, área específica superficial de 3,45 m²/kg, módulo de elasticidade de 210GPa e cada quilo do material contém 4.690 fibras.

Figura 7: Ilustração da ancoragem da fibra.



Fonte: ABNT NBR 15530 (2019)

Aditivo

O aditivo superplastificante Grace ADVA Cast 525 foi utilizado para garantir uma melhor trabalhabilidade. O aditivo é baseado em policarboxilato, possui uma massa específica de $1,06 \text{ g/cm}^3$, teor de álcalis de 0,60 %, ar incorporado de 1,00 % e pH em torno de 5-7. Após ensaios experimentais de abatimento para o traço escolhido, fixou-se o valor de 0,15 % de aditivo em relação a massa de cimento obtendo-se um valor de 16 cm de abatimento no concreto de referência (sem adição de fibras e sem substituição de agregado).

Agregado miúdo

Dois tipos de areias foram utilizados na execução dos concretos estudados, uma de origem natural e outra de origem artificial – areia de brita tipo I. As areias foram dosadas nos concretos na proporção em massa de 40 % de areia de origem natural e 60 % da areia de origem artificial, de modo a seguir a proporção utilizada no concreto base usinado.

Agregado graúdo

Utilizou-se brita 1 ($D_{m\acute{a}x} = 19 \text{ mm}$) e pedrisco ($D_{m\acute{a}x} = 9,5 \text{ mm}$) na execução dos concretos estudados. Após um estudo de massa unitária máxima, fixou-se que as britas seriam dosadas nos concretos na proporção em massa de 80 % de brita 1 e 20 % de pedrisco.

Nos concretos com agregado reciclado, a brita 1 foi substituída pelo agregado reciclado britado do concreto base nos teores estabelecidos. O pedrisco não foi substituído, pois sua dimensão máxima é menor do que a dimensão do agregado natural utilizado no concreto, e dessa forma poderia haver uma porção do agregado reciclado que seja puramente agregado natural. Embora essa seja uma estratégia interessante de viabilização do agregado reciclado de concreto, o trabalho tem o objetivo de estudar a situação crítica de substituição de AN por AR.

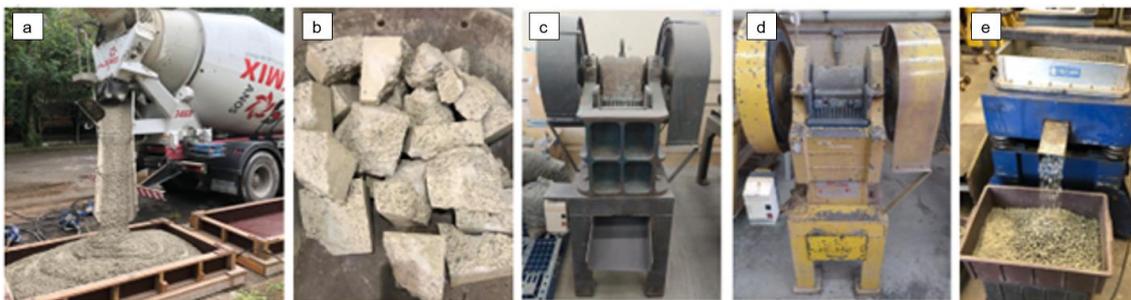
Concreto base

O concreto base de f_{ck} de 20 MPa, brita 0 ($D_{m\acute{a}x} = 12,5\text{ mm}$) e abatimento de 160 mm foi recebido de uma usina dosadora em estado fresco e foi moldado em placas. O material a ser ensaiado foi mantido em câmara úmida por 28 dias, já o restante do material foi curado nas próprias placas de montagem, através da molhagem e cobertura com lona plástica.

O material foi previamente quebrado com auxílio de martelete em tamanhos acessíveis ao britador das dependências do Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP, para então ser passado inicialmente em um britador de mandíbula primário com abertura de entrada de 14,2 cm e abertura de saída de 3,3 cm (motor de 10 CV e 1380 rpm). Em seguida utilizou-se um britador de mandíbula secundário de abertura de entrada de 8,7 cm, abertura de saída de 1,27 cm (motor de 7,5 CV e 1380 rpm).

O material foi peneirado após a britagem para se obter a faixa granulométrica desejada, correspondente a da brita 1 utilizada. O processo de obtenção do agregado reciclado está ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Processo de obtenção do agregado reciclado: (a) moldagem em placa, (b) quebra inicial com martelete, (c) britador de mandíbula primário e (d) secundário e (e) peneirador.



Fonte: Própria

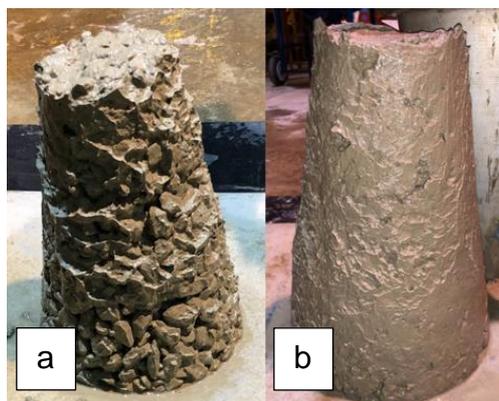
3.2 ESTUDO DE DOSAGEM

Os métodos de dosagem tradicionais demandam tempo e um uso expressivo de recursos, desse modo, foi proposto como atividade complementar a este estudo experimental, um novo método de dosagem de betonada única, capaz de construir uma correlação entre a resistência à compressão desejada para o concreto e a relação água/cimento empregada nele, por meio da Lei de Abrams. Além disso, este novo método visa determinar a relação linear entre abatimento do concreto e a relação água/materiais secos de modo que seja

possível definir simultaneamente a resistência à compressão e o abatimento com uma única betonada. Dessa forma, é possível diminuir o tempo dispendido na determinação dos traços que foram utilizados em todo o programa experimental da dissertação.

O primeiro passo, assim como no método tradicional consolidado no livro de Helene e Terzian (1995), é a determinação do teor ideal de argamassa para o traço inicial 1:M igual a 1:5 (cimento: agregados), sendo “M” a somatória dos agregados miúdos e graúdo. Parte-se de um valor de teor de argamassa de 41 % (Figura 9a) e aumenta-se esse teor gradativamente, verificando a consistência do concreto até se observar uma superfície coesa e compacta, sem desprendimento de agregados graúdos (Figura 9b). Então, obtém-se a proporção entre os materiais secos para os traços de 1:4, 1:5 e 1:6 (cimento: agregados), considerando diferentes teores de cimento no concreto.

Figura 9: Abatimento do concreto sem coesão por falta de argamassa (a) e do concreto no teor ótimo de argamassa (b).



Fonte: Própria.

Em seguida inicia-se o procedimento em uma única betonada, conforme descrito abaixo, para cada teor de cimento:

1. Adiciona-se o material seco na betoneira e uma quantidade inicial de água para garantir o mínimo de trabalhabilidade do concreto, anotando a primeira relação a/c (x1) e o primeiro abatimento obtido (a1).

2. Molda-se dois corpos de prova para serem ensaiados à compressão na idade desejada. Em seguida, adiciona-se uma quantidade de água que pode variar de 300 a 500 g para se obter um segundo abatimento (a2) e uma segunda relação a/c (x2), lembrando-se de descontar a massa de concreto retirada para a moldagem dos corpos de prova.

3. Esse procedimento é repetido no mínimo mais três vezes para se obter no total um mínimo de 5 pontos para o traçado de cada um dos gráficos.

4. Constrói-se o gráfico da relação água/materiais secos pelo abatimento e após a idade desejada do concreto rompe-se os CPs para construir o gráfico resistência à compressão por relação água/cimento.

3.3 MOLDAGEM E CURA

A produção dos concretos finais ocorreu em um misturador de eixo inclinado com capacidade de 300 litros e com 354 RPM de rotação do tambor, obedecendo a seguinte sequência:

- Imprimir a betoneira com uma porção de concreto, retirando o material excedente posicionando a boca da betoneira para baixo e em movimento;
- Introdução dos materiais pela seguinte ordem: 30 % de água, agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e restante da água com o aditivo diluído;
- Adicionar as fibras (quando houver) em pequenas porções com a betoneira em movimento, após a mistura do material e observação de coesão e plasticidade aceitáveis;
- Misturar por 2 minutos com uma parada intermediária para limpeza das pás da betoneira com o auxílio de uma colher de pedreiro;

Após a produção do concreto é realizado o ensaio de abatimento de cone e a moldagem dos corpos de prova com auxílio da mesa vibratória para o adensamento. Os corpos de prova são desmoldados no dia seguinte e armazenados em câmara úmida até o ensaio.

Após a moldagem e cura em câmara úmida de cada concreto foram realizados os entalhes de 25 mm no centro dos corpos de prova prismático e os corpos de prova cilíndricos foram retificados. Na Figura 10 é possível observar exemplares do concreto base, concreto com agregado natural, concreto com 20 % de AR e concreto com 50 % de AR, respectivamente.

Figura 10: Exemplos retificados do concreto base, com AN e com 20% e 50% de AR.



Fonte: Própria.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Agregados miúdos

As areias foram caracterizadas de acordo com os métodos especificados nas normas da ABNT para agregados miúdos. A granulometria, a massa específica e absorção foram realizadas conforme a NM248 (ABNT, 2003), NM 52 (ABNT, 2009) e NM30 (ABNT, 2001), respectivamente.

Agregados graúdos

As britas foram caracterizadas de acordo com os métodos especificados nas normas da ABNT para agregados graúdos. A granulometria, a massa unitária, e a massa específica e absorção foram realizadas conforme a NM248 (ABNT, 2003), NM 45 (ABNT, 2006) e NM53 (ABNT, 2009), respectivamente.

Concreto base

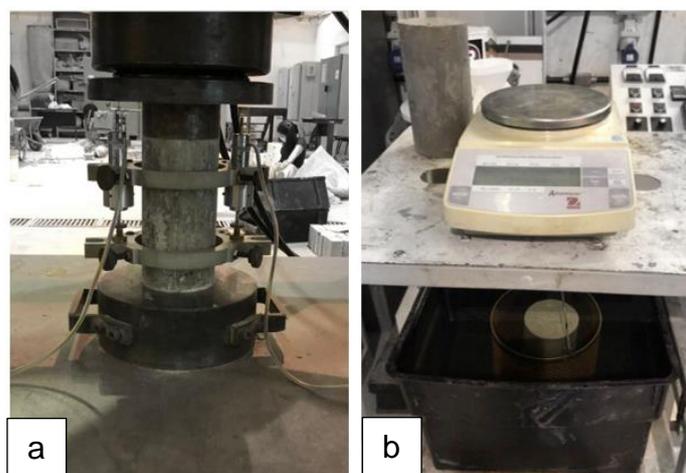
O concreto base foi caracterizado previamente à britagem, pois a utilização de um concreto pré-caracterizado para a produção dos agregados possibilitará a obtenção e calibração de parâmetros importantes a serem utilizados em modelagem computacional. Foram realizados ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739), módulo de elasticidade (ABNT NBR8522), massa específica, absorção e índice de vazios permeáveis (ABNT NBR9778) e ensaio de flexão em prismas com entalhe segundo a norma EN 14651 (2007).

Após a britagem do concreto, os agregados dele originados foram caracterizados segundo as suas características granulométricas, e quanto à massa unitária, massa específica e absorção de água (ABNT NBR NM248, 2009; NBR NM 45, 2006; e NBR NM 53, 2009, respectivamente).

Concreto endurecido

Já os concretos com os diferentes teores de agregados reciclados foram caracterizados quanto à sua resistência à compressão (ABNT NBR 5739, 2007) e módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522, 2008) na prensa Shimadzu, modelo UH2000 kN (Figura 11a) e foram caracterizados em relação a massa específica, índice de vazios e absorção de água (ABNT NBR 9778, 2005) com o auxílio da balança hidrostática (Figura 11b).

Figura 11: Equipamentos para os ensaios de caracterização: resistência à compressão e módulo de elasticidade (a) e ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água (b).

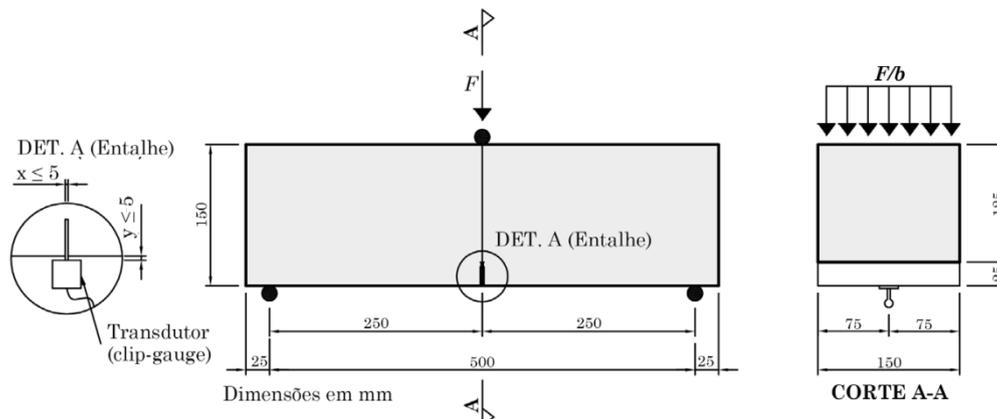


Fonte: Própria.

3.5 RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

A resistência à tração residual é a propriedade mecânica mais influenciada pela adição de fibras, e portanto esse é o parâmetro utilizado no dimensionamento das estruturas de CRF (DI PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013). Desse modo, para se obter parâmetros passíveis de serem aplicados nas análises computacionais, foi utilizado para a caracterização dos concretos o ensaio fechado de flexão em três pontos previsto na norma EN 14651 (2007), que é também o ensaio de referência estabelecido na norma brasileira ABNT NBR16935 (2021) e cujo esquema de ensaio está ilustrado na Figura 12.

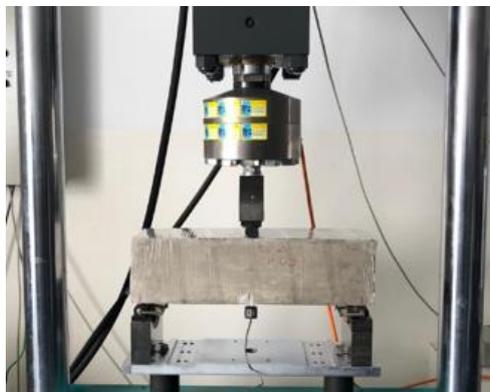
Figura 12: Esquema de ensaio à flexão em três pontos



Fonte: IBRACON/ABECE (2016).

Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados utilizando uma prensa dinâmica INTERMETRIC IM750SRV com capacidade da célula de carga de 500 kN e um extensômetro Clip Gauge, MTS Modelo 632.03C-20 com faixa nominal de leitura de 0 mm a 4 mm (Figura 13).

Figura 13: Equipamento de ensaio à flexão de três pontos.



Fonte: Própria.

Por meio desse ensaio é possível obter a curva força por abertura da boca do entalhe da fissura (CMOD) e então calcular o limite de proporcionalidade (Equação 6) e a resistência residual correspondente a distintos CMOD de interesse (Equação 7). Sendo F_L a carga máxima aplicada no meio do vão, para um valor de CMOD contido no intervalo de 0 a 0,5mm, l a distância entre os cutelos, b a largura do prisma e h_{sp} a altura do prisma menos a altura do entalhe.

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (6)$$

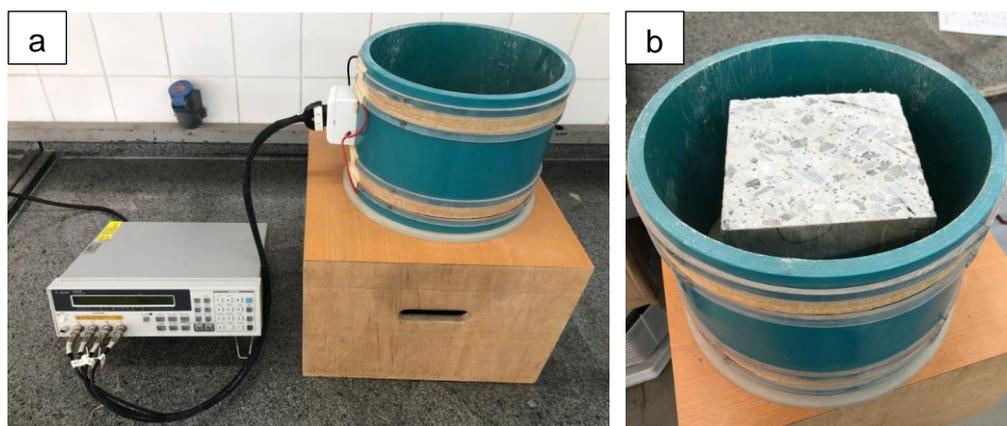
$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (7)$$

3.6 ENSAIO INDUTIVO

O ensaio indutivo proposto por Torrents *et al.* (2012) e aperfeiçoado por Cavalaro *et al.* (2014) é realizado após as moldagens dos concretos que contêm fibras para verificar se o teor de fibras nos corpos de prova corresponde com o valor que foi pré-estabelecido. Além disso, o ensaio permite prever a orientação das fibras, dados utilizados na modelagem numérica para aumentar a compatibilidade com a moldagem experimental. Também é possível relacionar os resultados do ensaio indutivo com os resultados do ensaio à flexão.

O ensaio utilizou como equipamento (Figura 14) uma bobina circular com 1200 espiras de cobre esmaltado e com duplo enrolamento do tipo Helmholtz, geradora de campo magnético, e um medidor LCR da Agilent modelo 4263B para medir a variação de indutância, cuja unidade é dada em Henry (H), fazendo uso das Leis de Faraday de eletromagnetismo. A geometria circular da bobina gera um campo eletromagnético praticamente uniforme, minimizando os erros de centralização dos corpos de prova no instrumento.

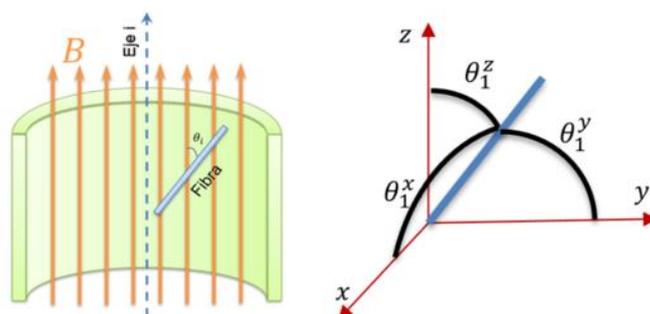
Figura 14: Ensaio indutivo: equipamento (a) e corpo de prova centralizado na bobina (b).



Fonte: Própria.

A quantidade de fibra é estimada através da somatória da indutância de três eixos genéricos adotados (Figura 15). No caso desse estudo o eixo X é relativo à largura do cubo, o Y ao comprimento no sentido longitudinal do prisma e Z à altura.

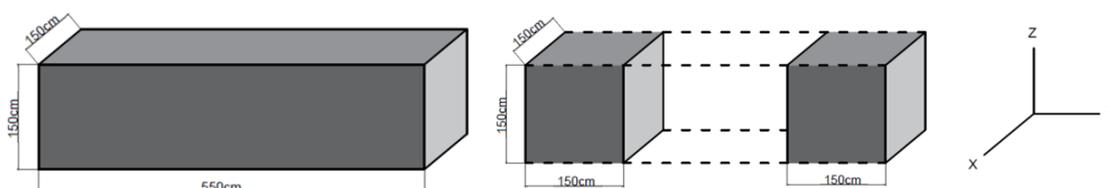
Figura 15: Posição de uma fibra dentro de um campo magnético e adoção de três eixos genéricos



Fonte: López (2013).

Para a realização do ensaio indutivo, retira-se dois corpos de prova de 15x15x15 cm dos extremos de cada corpo de prova prismático utilizado no ensaio de flexão (Figura 16). Como a fratura ocorre sempre no entalhe localizado no centro do prisma, os extremos permanecem conservados em seu formato.

Figura 16: Corte dos extremos da viga para realização do ensaio indutivo.



Fonte: Própria.

Existe uma relação linear entre a quantidade de fibra (C_f) e a indutância equivalente (L_e) ilustrada pela Equação 8 sendo L_i a variação da indutância em relação ao eixo i ; $B_{v,i}$ um coeficiente relacionado à geometria da amostra e da bobina; β uma constante determinada previamente no processo de calibração do equipamento.

$$C_f = \beta \cdot \sum \frac{L_i}{B_{v,i}} = \beta \cdot L_e \quad (8)$$

A contribuição relativa das fibras em relação a um determinado eixo i (C_i) pode ser determinada através da Equação 9, sendo o número de orientação (η_i) determinado pela Equação 10 onde γ é o fator de aspecto da fibra de aço utilizada. O valor do fator de aspecto da fibra pode ser obtido pela razão entre a indutância de uma fibra perpendicular e uma fibra paralela ao campo magnético, e o valor de 0,05 será adotado, conforme utilizado por Cavalaro *et al.* (2014).

$$C_i = \frac{\eta_i}{(\sum_{i=x,y,z} \eta_i)} \quad (9)$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\Delta L_i \cdot (1 + 2 \cdot \gamma) - \Delta L \cdot \gamma}{\Delta L \cdot (1 - \gamma)}} \quad (10)$$

O ensaio indutivo é rápido, barato, simples e não destrutivo, no entanto exige uma calibração prévia. O princípio de funcionamento do ensaio é baseado no fato de todos os materiais apresentarem uma resistência ao serem submetidos por um fluxo de corrente elétrica, conhecida como resistividade. O concreto, por ser mal condutor de corrente elétrica, apresenta alta resistividade enquanto o aço apresenta baixa resistividade. Desta forma, quanto maior a quantidade de fibras, menor será a resistividade do CRFA que está sendo caracterizado.

Para realizar o procedimento de calibração do ensaio indutivo e determinação da constante β são construídos corpos de prova de isopor com as quantidades de 50 g e 100 g de fibras de aço, inseridas perpendicularmente à base dos cubos de 15 cm de aresta (Figura 17).

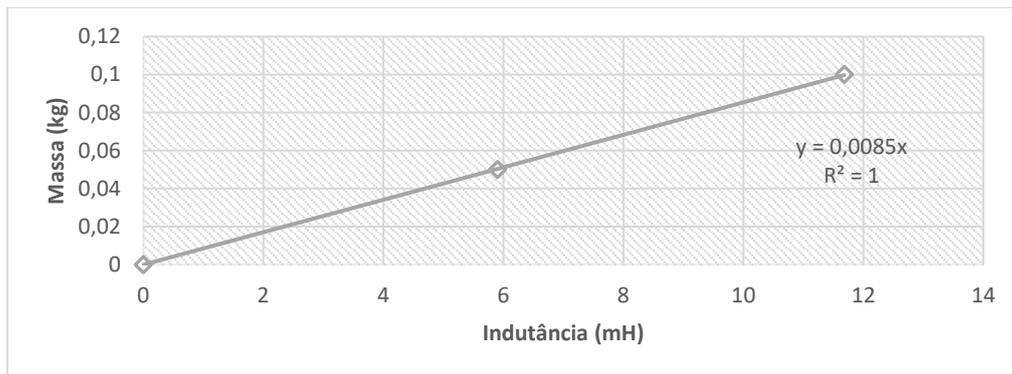
Figura 17: Cubos de isopor para calibração do ensaio indutivo.



Fonte: Própria.

Dessa forma, é possível obter uma reta de calibração conforme a apresentada na Figura 18, que correlaciona a massa de fibra de aço presente no corpo de prova com a indutância medida. Sabendo que a indutância deve ser nula para uma massa de aço igual a zero, impõe-se que a regressão passe pela origem.

Figura 18: Reta de calibração do ensaio indutivo.



Fonte: Própria.

3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

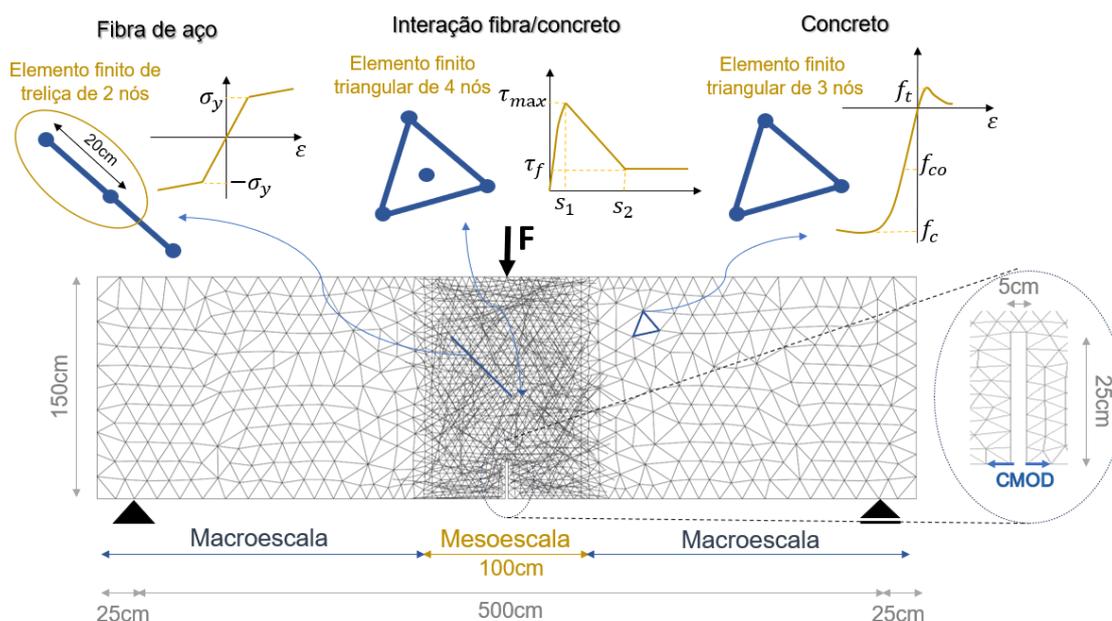
As análises computacionais desse estudo foram realizadas baseadas no modelo numérico proposto por Bitencourt *et al.* (2019), cuja principal vantagem da abordagem é a possibilidade de considerar os fatores que influenciam no comportamento do material separadamente, como a matriz cimentícia, a distribuição das fibras e a interação fibra-matriz. Recentemente essa abordagem foi utilizada com sucesso na modelagem de ensaios de caracterização para a obtenção de parâmetros pós-fissuração do material (TRINDADE *et al.*, 2020), bem como na previsão do comportamento de vigas ao ELS e ELU (TRINDADE; BITENCOURT; MANZOLI, 2020). Além disso, Mineiro *et al.* (2022), utilizaram o modelo para estudar a interação matriz cimentícia e fibras de aço com ganchos através de ensaios de arrancamentos de fibras.

A Figura 21 ilustra o modelo numérico desenvolvido para a previsão do comportamento dos ensaios de flexão em três pontos ensaiados nessa pesquisa. A malha de elementos finitos do concreto é gerada baseando-se em uma geometria definida, e então as fibras são adicionadas de maneira independente, usando a malha de concreto como referência do domínio de distribuição. Para descrever a interação entre as fibras e o concreto, um esquema de acoplamento de malhas de elementos finitos não conformes é empregado conforme proposto por Bitencourt Jr. (2015). Através dessa metodologia, elementos finitos de acoplamento (EFA) (Bitencourt Jr. *et al.* (2015)) são inseridos para descrever a interação entre as fibras e a matriz

cimentícia. O modelo constitutivo sugerido por Cunha (2010) é utilizado para descrever o comportamento de arrancamento das fibras (ver Figura 19).

Os modelos constitutivos utilizados e os elementos finitos empregados são ilustrados na Figura 19. A fibra de aço foi modelada utilizando um elemento finito de treliça de 2 nós e o seu comportamento é descrito por um modelo de material elastoplástico unidimensional utilizando os parâmetros fornecidos pelo fabricante. Considerou-se uma distribuição uniforme isotrópica randômica das fibras, utilizando as taxas reais de teor de fibras obtida no ensaio indutivo realizado na etapa experimental. Já os EFA são representados por um elemento triangular de 4 nós, enquanto o concreto é representado por elementos finitos triangulares de três nós.

Figura 19: Modelo numérico desenvolvido para simulação do ensaio de flexão em três pontos para o teor de 20 kg/m³ de fibras de aço.



Fonte: Própria.

Embora as análises tenham sido realizadas em duas dimensões para evitar um alto custo computacional, as fibras foram geradas considerando as três dimensões do corpo de prova conforme proposto por Trindade et. al (2020). Além disso, também para evitar um alto custo computacional, o uso de modelos em multiescala vem sendo empregado com sucesso para descrever o comportamento de CRF conforme relatado na subseção 2.4. Nesse caso, um modelo com representação discreta e explícita das fibras de aço é empregado na região central do domínio do problema, onde se há expectativa do surgimento

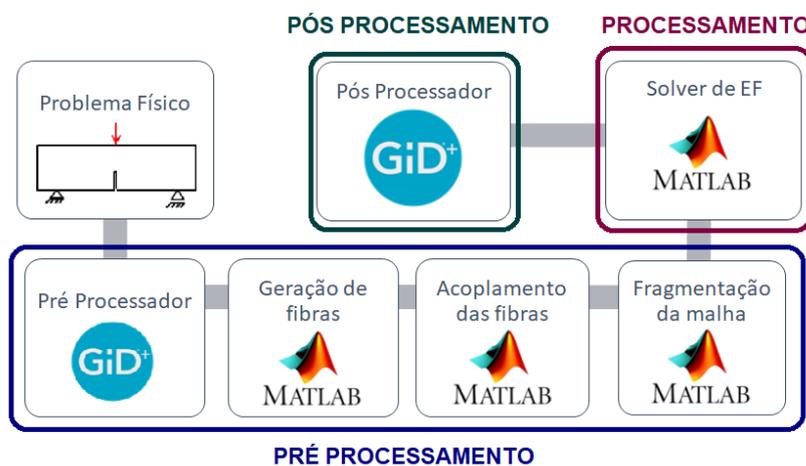
de uma fratura em Modo-I, enquanto o restante do domínio é representado por um modelo em macroescala com propriedades mecânicas efetivas dos constituintes do compósito. Em ambas as regiões, o agregado é representado de maneira implícita, por meio das propriedades homogeneizadas do concreto pré-caracterizado.

Somente na região central foi utilizada a técnica de fragmentação de malha de elementos finitos. Nesse modelo são inseridos elementos finitos de interface com alta razão de aspecto entre os elementos da malha original, definindo assim os possíveis caminhos de propagação da fissura. Foi utilizado um modelo de dano à tração conforme descrito na subseção 2.4 para descrever o processo de falha do material.

Uma técnica implícita-explícita (esquema impl-ex) (PRAZERES *et al.*, 2015) foi utilizada para integrar os modelos constitutivos de dano à tração empregado para descrever o comportamento dos elementos de interface na técnica de fragmentação de malhas (MANZOLI *et. al.*, 2016), e o modelo constitutivo usado para descrever o comportamento das interfaces fibras-matriz (BITENCOURT Jr., 2015). Esse esquema de integração possui como principal vantagem evitar problemas de convergência numérica, no entanto, são necessários passos de carga pequenos para se obter a curva de equilíbrio (resposta do problema). Nesta pesquisa foram empregados 10 mil passos de carga em todas as análises para garantir convergência com o esquema de integração.

Por fim, é importante destacar que foram utilizados dois programas: o GiD para as etapas de pré e pós-processamento, e o MATLAB na etapa de processamento (resolução do problema via MEF) e auxílio do pré-processamento (Figura 20). Na etapa de processamento, o GiD é utilizado para geração da geometria, atribuição de materiais, definição das condições de contorno e geração da malha. Na etapa de pós-processamento ele é empregado para tratamento dos resultados, como obtenção do campo de fissuração, campo de tensões e deformações, bem como as curvas estruturais.

Figura 20: Fluxo do processo de simulação via método dos elementos finitos usando a metodologia proposta por Bitencourt Jr. (2015).



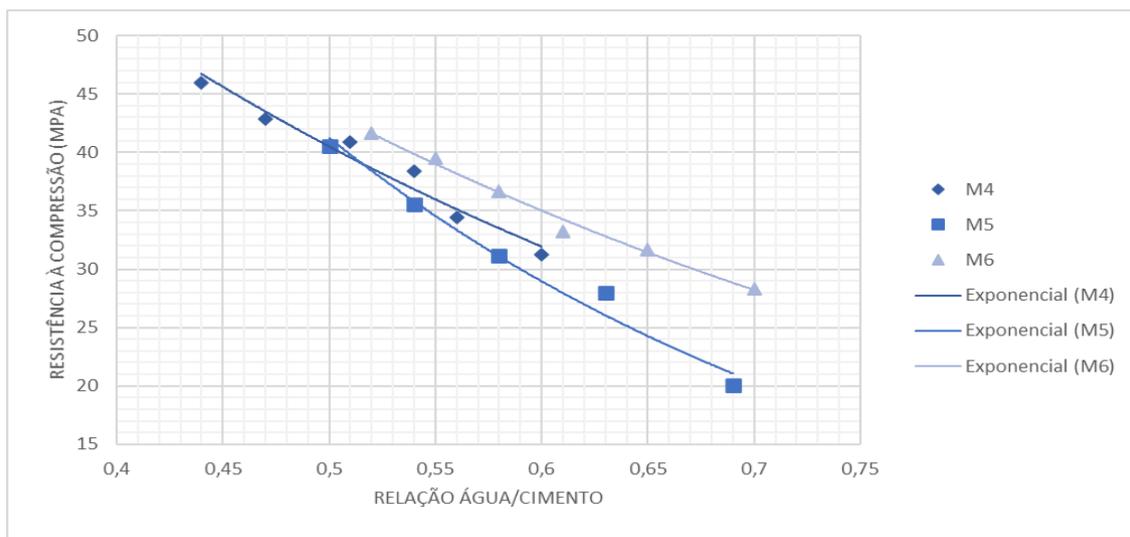
Fonte: Própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DO ESTUDO DE DOSAGEM

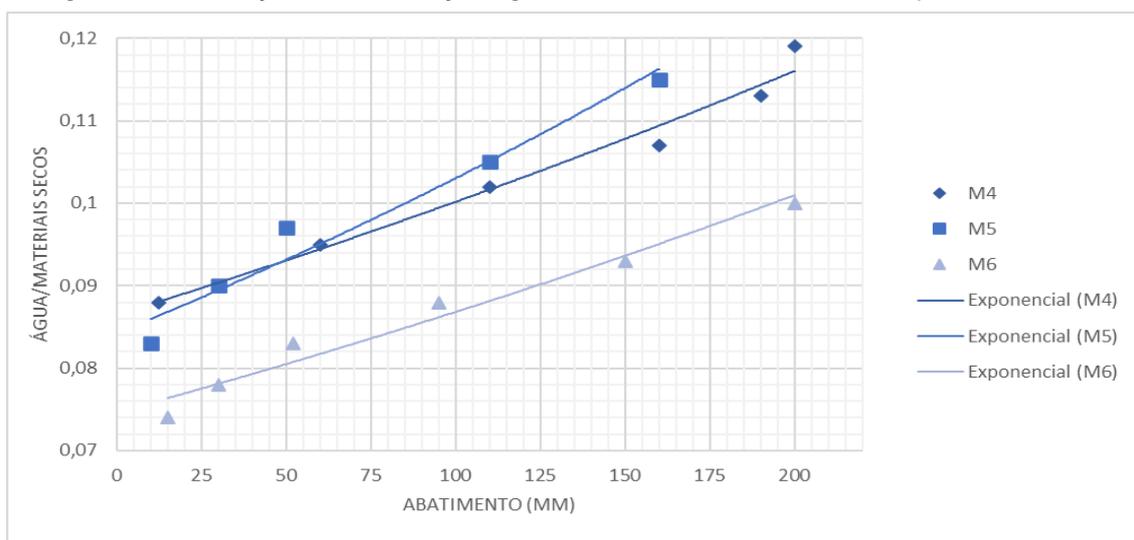
No estudo de dosagem foram obtidos os gráficos de resistência à compressão por relação água/cimento (Figura 21) e o gráfico da relação água/materiais secos pelo abatimento (Figura 22).

Figura 21: Correlação entre a resistência à compressão e relação a/c para M=4, 5 e 6.



Fonte: Própria.

Figura 22: Correlação entre a relação água/materiais secos e abatimento para M=4, 5 e 6.



Fonte: Própria.

Como a resistência à compressão desejada era de 40 MPa, a curva do M=4 foi escolhida por atingir a resistência esperada com a melhor trabalhabilidade, e para isso foi utilizada uma relação a/c=0,5. Dessa forma, fixou-se o traço em massa de 1:1,55:2,45 (cimento: areia: brita) com relação a/c de 0,5 para a produção de todos os concretos. Ao final do estudo o consumo de cimento foi de 430 kg/m³ e o teor de argamassa de 51%.

Sabe-se que a presença de agregado reciclado, devido à sua maior porosidade, altera a trabalhabilidade do concreto aumentando a sua tensão de escoamento. Isso ocorre devido à maior absorção de água dos agregados reciclados e por isso recomenda-se uma pré-molhagem ou compensação de água para manter as propriedades reológicas (ABNT NBR15116, 2021), entretanto esse ajuste altera as propriedades mecânicas do estado endurecido, de maneira que passa a ser mais interessante o uso de aditivos superplastificantes nos ajustes reológicos quando necessário. A Tabela 2 apresenta a dosagem dos concretos utilizados nesse estudo.

Tabela 2: Dosagem dos concretos para os diferentes teores de AR.

Material	AN	20% de AR	50% de AR
Cimento CP-V ARI (kg/m ³)	430	430	430
Agregado miúdo natural (kg/m ³)	266.6	266.6	266.6
Agregado miúdo artificial (kg/m ³)	399.9	399.9	399.9
Agregado graúdo D _{máx} =19 mm (kg/m ³)	842.8	674.2	421.4
Agregado graúdo D _{máx} =9.5 mm (kg/m ³)	210.7	210.7	210.7
Agregado graúdo reciclado (kg/m ³)	0	141,8	354.5
Água (kg/m ³)	215	215	215
Superplastificante (g/m ³)	645	645	645
Fibra DRAMIX 80/60 BG (kg/m ³)	20 / 35 / 50	20 / 35 / 50	20 / 35 / 50

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados em relação a sua absorção (A) e massa específica na condição saturado com superfície seca (d_s). Os agregados graúdos foram caracterizados também em relação a sua massa unitária (Tabela 3). Já a granulometria dos agregados está disponível na Figura 23 e na Tabela 4.

Tabela 3: Propriedades dos agregados miúdos e graúdos.

Tipo de agregado		A (%)	ds (g/cm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)
Miúdo	Natural	0,19 (±0,01)	2,53 (±0,01)	-
	Artificial	1,05 (±0,45)	2,60 (±0,03)	-
Graúdo	Brita 1	0,55 (± 0,10)	2,77 (±0,01)	1,62
	Pedrisco	1,70 (±0,37)	2,71 (±0,01)	1,58
	Reciclado	9,19 (±0,46)	2,33 (±0,01)	1,20

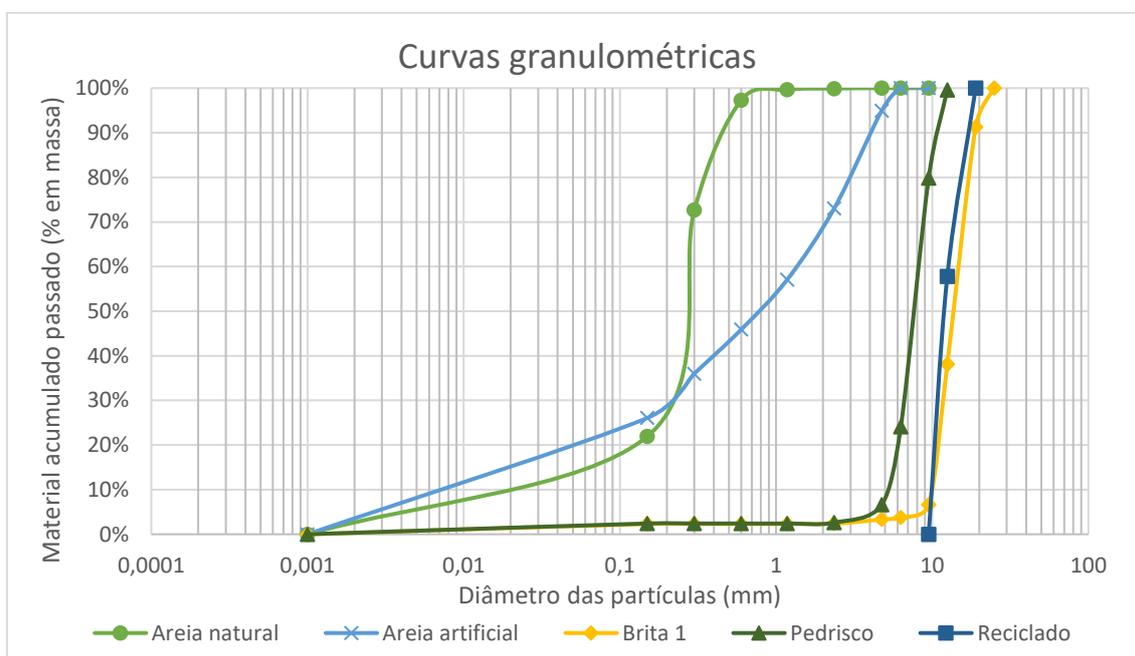


Figura 23: Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados.

Tabela 4: Informações granulométricas dos agregados graúdos e miúdos utilizados.

Tipo de agregado		MF (-)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u (-)	C_c (-)
Miúdo	Natural	1,09	0,26	0,17	0,07	3,71	1,66
	Artificial	2,67	1,40	0,21	0,06	23,26	0,52
Graúdo	Brita 1	6,87	15,17	11,73	9,82	1,55	0,92
	Pedrisco	6,01	8,36	6,64	5,05	1,66	1,04
	Reciclado	7,00	12,39	15,63	17,88	0,69	1,10

É possível observar na Tabela 3 que o valor da absorção do agregado reciclado chega a ser mais de 15 vezes o valor da absorção de água da brita 1. Já em relação a massa específica, conforme esperado, o agregado reciclado possui o menor valor pois foi produzido a partir de um concreto com resistência convencional de $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$.

Também se realizou o ensaio de massa unitária máxima com o intuito de se obter a proporção de britas com melhor capacidade de empacotamento. O valor máximo foi de $1,67 \text{ kg/dm}^3$ na proporção de 80 % de brita 1 e 20 % de pedrisco, portanto essa foi a proporção utilizada.

Para melhor estudo dos resultados, também foram medidas as massas unitárias dos agregados – incluindo o agregado reciclado - na proporção utilizada nos concretos com 20 % e 50 % de substituição por AR, cujos valores estão ilustrados na Tabela 5.

Tabela 5: Massa unitária agregados graúdo.

Proporção agregados graúdos	Massa Unitária (kg/dm^3)
Proporção do concreto 0% de AR	1,67 ($\pm 0,01$)
Proporção do concreto 20% de AR	1,67 ($\pm 0,03$)
Proporção do concreto 50% de AR	1,49 ($\pm 0,01$)

Dos resultados da Tabela 5 era esperado uma redução de massa unitária com o aumento de substituição de AN por AR devido à menor densidade do agregado reciclado. Como isso não ocorreu para o teor de 20% de AR é possível concluir que esse teor apresentou um melhor empacotamento quando comparado ao concreto com agregado natural. Já para o concreto com teor de 50% de AR era esperada uma massa unitária em torno de $1,57 \text{ kg/dm}^3$. No entanto, como o resultado encontrado está abaixo desse valor, conclui-se que houve um pior empacotamento para essa proporção quando comparado ao concreto com agregado natural.

Já a respeito do concreto base que gerou o agregado reciclado nesse estudo, o abatimento obtido no seu estado fresco foi de 160 mm e a resistência à compressão e módulo de elasticidade foi de $20,7 \text{ MPa}$ ($\pm 1,06 \text{ MPa}$) e $22,47 \text{ GPa}$ ($\pm 0,48 \text{ GPa}$) aos 28 dias. Já os valores de absorção (A), índice de vazios (I_V) e massa específica saturada (ρ_{sat}) foram 6,69 %, 14,75 % e $2,35 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. As propriedades mecânicas indicam uma maior

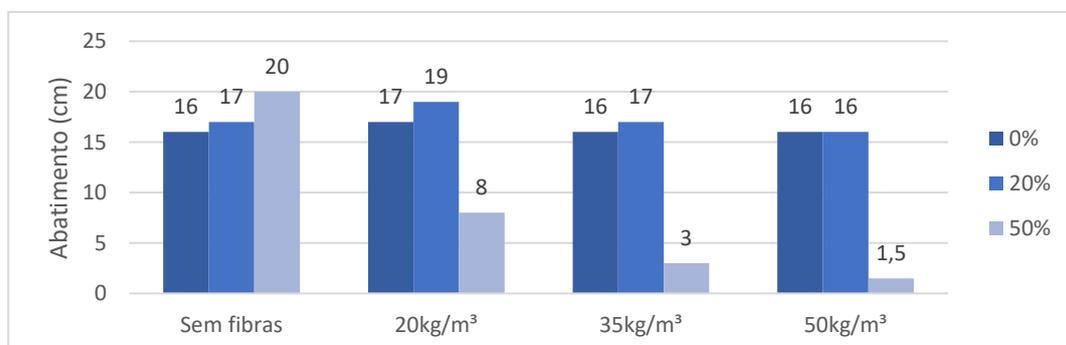
porosidade em relação ao concreto de f_{ck} 40 MPa, sendo esses resultados esperados e desejados para a análise da utilização do CAR na condição crítica.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

A Figura 24 apresenta os resultados de abatimento em tronco de cone realizado em todos os concretos finais no estado fresco. É possível notar que a quantidade de fibras adicionadas não ocasionou influência significativa na perda de trabalhabilidade no concreto com agregado natural e no concreto com 20 % de agregado reciclado. Isso ocorre pois nessas duas famílias o volume de fibras adicionado foi baixo, menor que o 0,7 % em volume, e o teor de argamassa utilizado foi dosado no concreto referência para ser um teor ideal.

Já no concreto com 50 % de substituição de agregado natural por reciclado existe uma clara influência da adição de fibras no abatimento do concreto. Como o agregado reciclado possui uma absorção alta de 9,19 % em média, mais de 15 vezes o valor da absorção do agregado natural, houve uma alta demanda por água de molhagem tanto da parte do agregado quanto por parte da fibra com o aumento da área superficial, tornando o concreto mais suscetível à perda de abatimento. Além disso, como o agregado reciclado possui uma densidade menor que o agregado natural e o ensaio de abatimento é um ensaio gravitacional, existe uma maior dificuldade de mobilidade do sistema quando as fibras atuam travando o mesmo.

Figura 24: Abatimento médio das amostras.



Fonte: Própria.

Os valores médios dos resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica, absorção de água e índice de vazios estão apresentados nas Figuras 25, 26, 27, e 28, respectivamente. Todos os resultados de caracterização dos concretos estão disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados.

Teor AR (%)	Teor fibras (kg/m ³)	f _{cm} (MPa)	E (GPa)	A (%)	I _v (%)	ρ _{sat} (g/cm ³)
0	0	45,6 (±1,92)	33,61 (±1,28)	6,46 (±0,37)	14,74 (±0,66)	2,43 (±0,02)
	20	45,4 (±1,99)	30,55 (±2,58)	6,17 (±0,16)	14,29 (±0,45)	2,46 (±0,02)
	35	45,3 (±1,36)	31,89 (±0,64)	6,22 (±0,19)	14,45 (±0,38)	2,47 (±0,01)
	50	46,1 (±2,10)	32,09 (±0,69)	6,36 (±0,04)	14,74 (±0,07)	2,47 (±0,01)
20	0	44,9 (±2,51)	30,51 (±1,86)	6,92 (±0,13)	15,38 (±0,22)	2,38 (±0,01)
	20	44,6 (±0,45)	32,06 (±2,13)	7,11 (±0,24)	15,97 (±0,64)	2,41 (±0,02)
	35	43,5 (±1,51)	29,16 (±1,01)	7,24 (±0,06)	16,33 (±0,09)	2,42 (±0,03)
	50	41,9 (±1,08)	31,72 (±2,46)	6,74 (±0,06)	15,19 (±0,20)	2,41 (±0,01)
50	0	39,8 (±0,89)	27,18 (±0,62)	7,16 (±0,22)	15,66 (±0,42)	2,34 (±0,01)
	20	40,2 (±0,37)	28,64 (±0,27)	6,75 (±0,37)	14,97 (±0,59)	2,37 (±0,03)
	35	40,9 (±1,76)	27,17 (±1,65)	6,89 (±0,01)	15,33 (±0,02)	2,38 (±0,01)
	50	41,0 (±1,47)	26,97 (±0,36)	7,11 (±0,02)	15,80 (±0,05)	2,38 (±0,01)

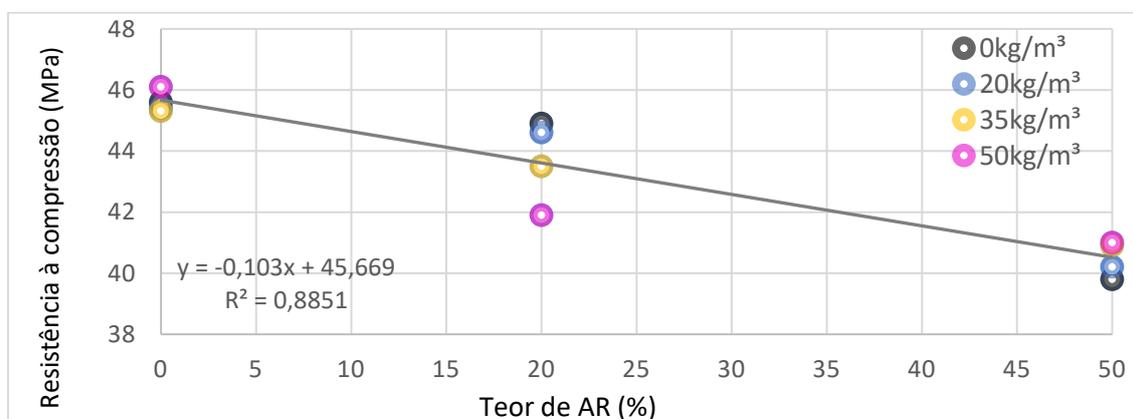
Após análise estatística de variância de dois fatores (Tabela 7) foi verificado que os valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade, índice de vazios e absorção de água não são influenciados pela quantidade de fibras adicionadas, considerando um nível de significância menor que 0,05. Esses resultados vão de encontro com a literatura, que observa apenas alteração da resistência à compressão e módulo de elasticidade para teores mais altos de fibras, a partir de 0,5 % de fibra em volume (GAO *et al.*, 2020; FUIAN *et al.*, 2022; ALI *et al.*, 2022). Apenas o resultado de massa específica apresentou uma diferença estatística significativa (p igual a 0,009) entre as amostras sem fibras comparando com as amostras de 35 kg/m³ e 50 kg/m³ de fibras.

Tabela 7: Valores de p da análise estatística.

Valor de p	Compressão	Mód. Elasticidade	Índ. vazios	Absorção
Teor de fibra	0,894	0,464	0,635	0,498
Teor de AR	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

Já ao comparar os concretos com diferentes teores de substituição de AN por AR, foi possível notar uma diferença estatisticamente significativa entre as capacidades de resistência à compressão (Tabela 7), sendo que os teores de 20 % e 50 % de substituição de AN por AR geraram uma redução média na resistência à compressão de aproximadamente 8 % e 13 % respectivamente (Figura 25).

Figura 25: Resistência média à compressão das amostras por teor de AR.

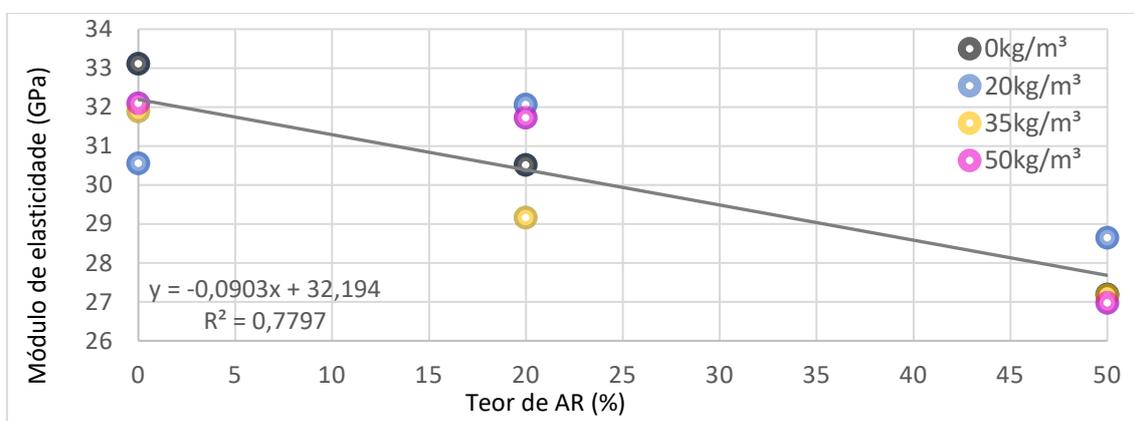


Fonte: Própria.

Já em relação ao módulo de elasticidade, os teores de 0 % e 20 % não apresentaram uma diferença estatística significativa entre si. Isso ocorre pois o

volume do agregado reciclado no concreto foi baixo, representando apenas 7,76 % do volume total do concreto. Além disso, verificou-se através do ensaio de massa unitária máxima que os agregados graúdos dos concretos com 0 % e com 20 % de AR possuem a mesma massa unitária. Já o teor de 50 % de substituição de AN por AR apresentou uma redução média no módulo de elasticidade de 14 % em comparação ao concreto com agregado natural já que o volume do agregado reciclado no concreto é mais significativo e a massa unitária dos agregados graúdos é menor. Ainda assim, é possível observar na Figura 26 uma tendência de redução do módulo com o aumento do teor de AR.

Figura 26: Módulo de elasticidade médio das amostras por teor de AR.

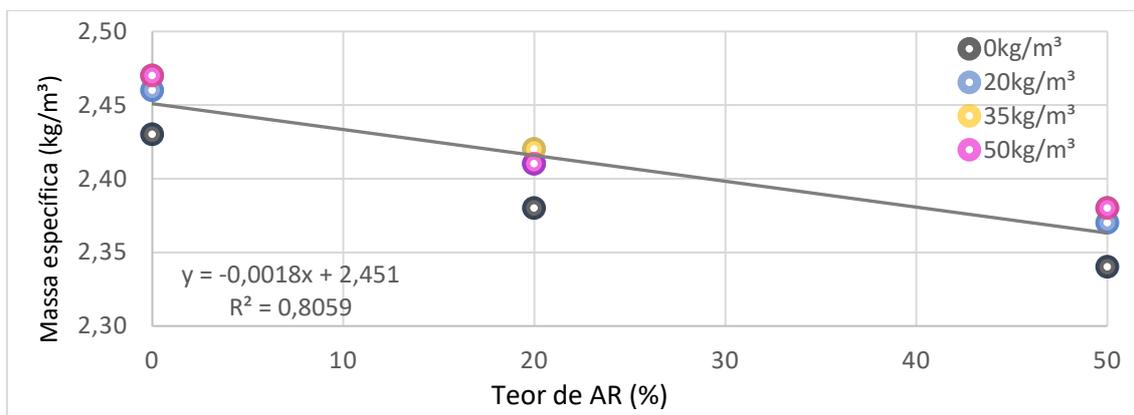


Fonte: Própria.

A redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o aumento da substituição de agregado natural por reciclado era esperada e vai de encontro ao estudo de Ramesh, Mirza e Kang (2018).

Também foi possível notar que quanto maior o teor de substituição de AN por AR, maior foi a redução da massa específica, com uma queda em relação ao concreto com agregado natural de 2,2 % e 3,6 % para os teores de 20 % e 50 % de substituição respectivamente (Figura 27).

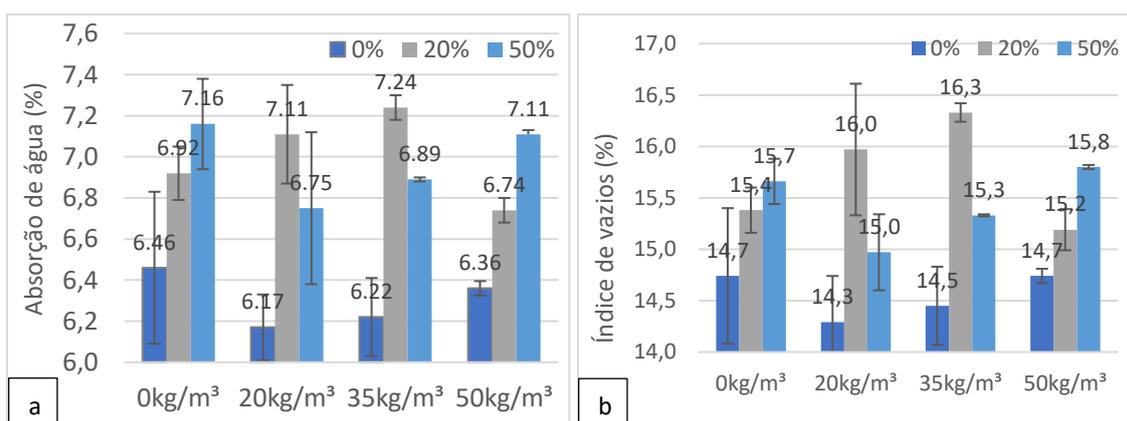
Figura 27: Massa específica média das amostras por teor de AR.



Fonte: Própria.

Já em relação a absorção e ao índice de vazios há um aumento de ambos ao se utilizar agregado reciclado (Figura 28), conforme esperado devido ao aumento da porosidade. Entretanto, não houve uma diferença estatisticamente significativa de absorção e índice de vazios entre os concretos com 20 % e 50 % de substituição de AN por AR. O aumento de absorção em relação ao agregado natural foi em torno de 11 % para ambos os teores, já o aumento do índice de vazios foi de 8 % e 6 % para os teores de 20 % e 50 % respectivamente.

Figura 28: Caracterização dos concretos em relação a absorção de água (a) e índice de vazios (b) médio das amostras.

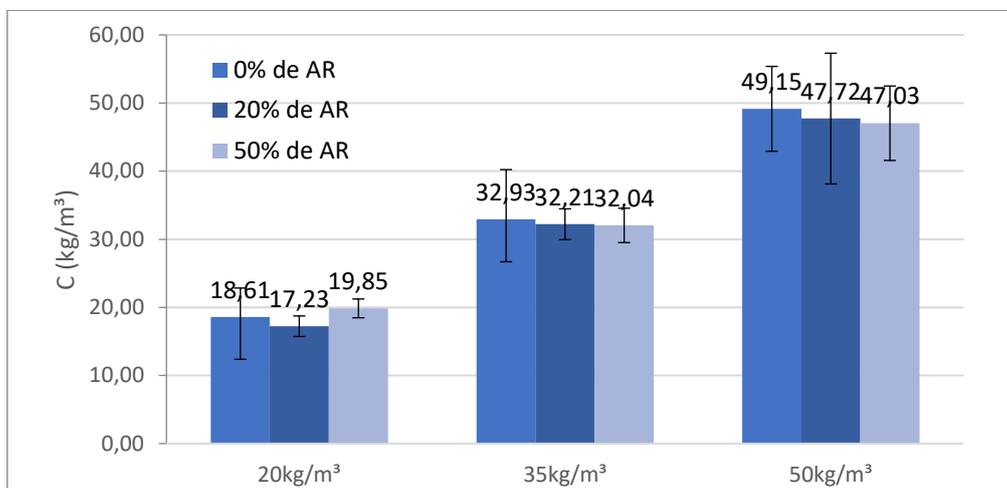


Fonte: Própria.

A Figura 29 apresenta os valores médios da quantidade de fibras de cada amostra, onde é possível verificar que a quantidade de fibras nos corpos de prova moldados ficou um pouco abaixo do valor esperado. Isto ocorre pelo fato de se realizar essa dosagem inferindo-se propriedades como a própria

densidade do concreto, o que é determinável com precisão apenas após a sua produção.

Figura 29: Valores médios da quantidade de fibras.



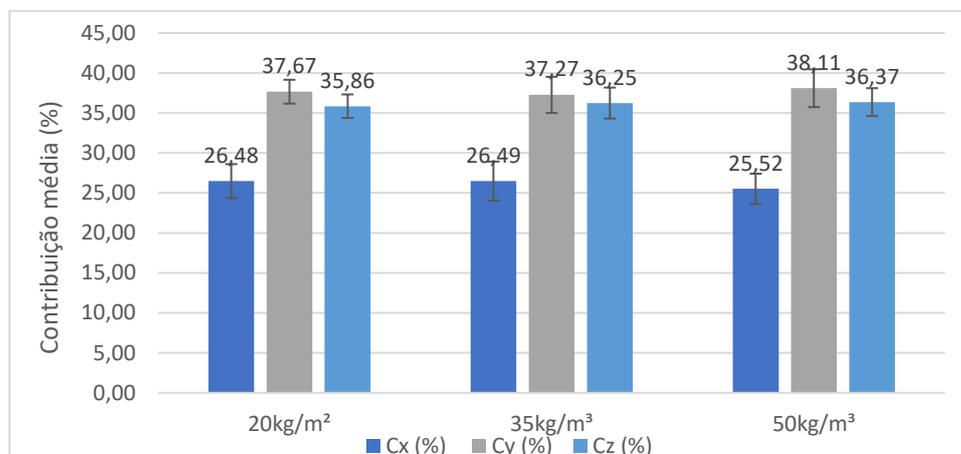
Fonte: Própria.

A variação da quantidade de fibras entre os corpos de prova de uma mesma amostra explica a maior dispersão de resultados mecânicos quando comparada à amostra do concreto sem fibras, por exemplo.

A utilização do ensaio indutivo permite, por outro lado, realizar uma determinação precisa do conteúdo de fibras, permitindo análises mais apuradas e confiáveis. Adotou-se os eixos “X”, “Y”, e “Z” como os eixos referentes a profundidade, comprimento e altura do prisma respectivamente, conforme apresentado no item 3.6.

É possível perceber na Figura 30 que as fibras se orientam preferencialmente pelo eixo relativo ao comprimento da viga (eixo y), em seguida ao eixo relativo à altura (eixo z) e por último à espessura (eixo x). Também se nota que a contribuição média por eixo em percentagem é equivalente para todos os teores de fibras adicionados.

Figura 30: Contribuição média das fibras por eixo do sistema de referência adotado no ensaio indutivo.



Fonte: Própria.

A orientação preferencial pelo eixo longitudinal da viga é observada na literatura e ocorre pelo efeito parede (FERRARA, 2015). Em contrapartida, as fibras também tendem a se orientar no eixo da altura da viga devido a vibração no momento de adensamento dos corpos de prova, que causa uma movimentação das fibras devido à sua maior densidade em relação à argamassa do concreto.

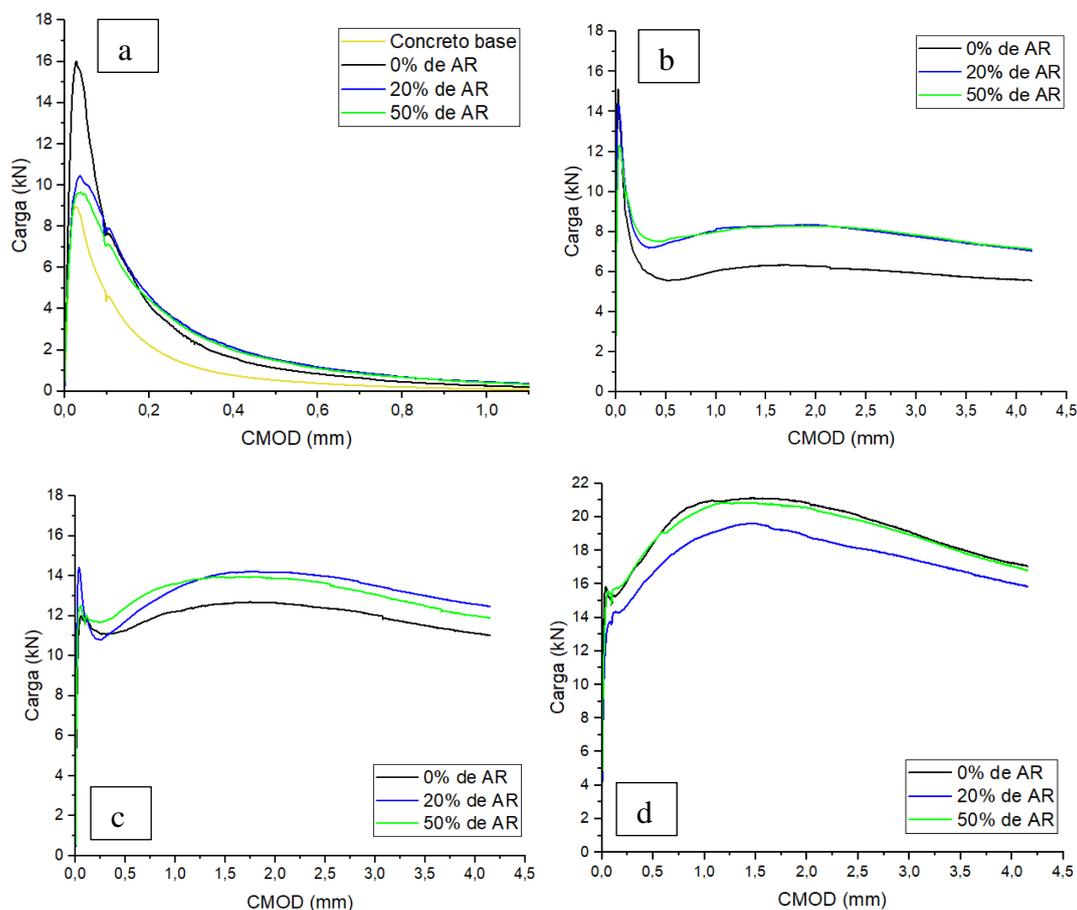
Os resultados brutos dos ensaios indutivos estão disponíveis no Apêndice A.

4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO

Os resultados apresentados neste item foram obtidos segundo a metodologia apresentada no item 3.5. A Figura 31 ilustra a curva média da relação carga por abertura de fissura obtida no ensaio de flexão de todos os concretos estudados.

Comparando os gráficos carga por CMOD dos concretos é possível verificar que a resistência residual se mostrou mais diretamente associada à quantidade de fibras adicionadas do que à resistência da matriz, sendo observado um comportamento de *hardening* para o teor de fibra de 50 kg/m³.

Figura 31: Carga por CMOD para os concretos: (a) sem adição de fibras, (b) 20 kg/m³ de fibras de aço, (c) 35 kg/m³ de fibras de aço e (d) 50 kg/m³ de fibras de aço.



Fonte: Própria.

Na Figura 31(a) o concreto com 20 % e 50 % de AR apresenta uma carga máxima menor, cerca de 70 % do valor obtido pelo concreto referência, confirmando que substituição de agregado natural por reciclado prejudicou a resistência máxima à flexão de maneira mais intensa quando comparada a resistência à compressão. Entretanto, ao adicionarmos fibras (Figura 31b, 31c e 31d) é possível observar que o pico de carga máxima dos concretos com agregado reciclado volta a ficar próximo da carga máxima suportada pelo concreto com agregado natural, indicando que o uso de agregado reciclado possui um impacto menor em concretos com fibras de aço.

Esse resultado vai de encontro com o resultado de outros pesquisadores (ELAVARASAN, POORNIMA e PRIYA, 2022; KAPLAN *et al.* 2021; ALI *et al.* 2021; ANIKE *et al.* 2022) que observaram um aumento da resistência limite à flexão com o aumento do teor de fibras para concretos com agregado reciclado,

podendo inclusive ultrapassar a resistência limite à flexão do concreto com agregado natural. Ainda, pesquisadores observaram que esse mesmo comportamento não é tão expressivo em concretos com agregado natural (CHAN *et al.* 2019; GAO, ZHANG e NOKKEN 2017).

A Tabela 8 apresenta os valores de P para uma análise estatística de dois fatores realizado no *software Statistica* para a tensão limite (f_L) e residuais. Existe uma diferença estatística significativa na resistência limite quando as fibras são adicionadas, sendo a resistência do agregado natural maior do que a resistência limite do concreto com agregado reciclado quando não há adição de fibras, embora não haja diferença estatística para esse parâmetro entre o teor de 20 % e 50 % de substituição de AN por AR.

Tabela 8: Valores de p para a resistência limite e as resistências residuais.

Valor de P	f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
Teor de fibra	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Teor de AR	10^{-4}	0.802	0.862	0.902	0.915

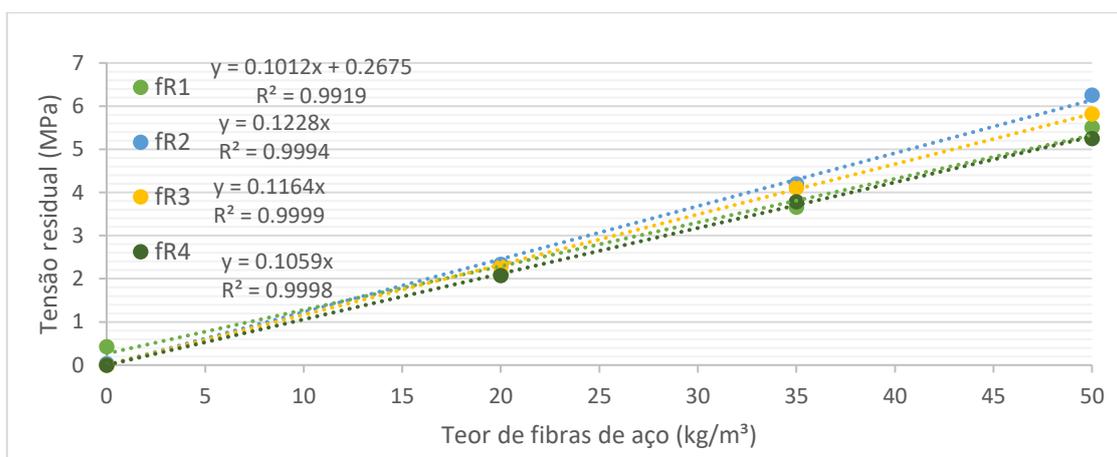
A Tabela 9 ilustra o resultado de análise de variância de dois fatores realizado no *software Statistica*, onde é possível verificar que para o teor de 20% de AR o aumento significativo da resistência limite ocorre a partir do teor de fibras de 20 kg/m³, enquanto para o teor de substituição de 50% de AR essa mesma resistência aumenta significativamente apenas com a adição de 50 kg/m³ de fibras.

Tabela 9: Análise de variância de dois fatores para a resistência limite dos concretos.

FIBRAS (kg/m ³)	AR (%)	f_L	1	2	3	4	5
0	0	5,106667				****	
0	20	3,310000					****
0	50	3,070000					****
20	0	4,667500	****		****	****	
20	20	4,452000	****	****	****	****	
20	50	3,762000		****			****
35	0	3,807500	****	****			****
35	20	4,470000	****	****	****	****	
35	50	3,846000	****	****			****
50	0	4,980000			****	****	
50	20	4,142000	****	****	****		
50	50	4,622000	****		****	****	

Já nas tensões residuais, f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} e f_{R4} , não há uma diferença estatística entre os diferentes teores de substituição de AN por AR, conforme observado na Tabela 7. Já em relação ao teor de fibras, há um aumento de tensão residual linear com aumento do teor de fibras de aço para os teores estudados, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32: Relação linear entre as tensões residuais e a quantidade de fibras adicionada.



Fonte: Própria.

Os resultados brutos dos ensaios de flexão de três pontos estão disponíveis no Apêndice B e é particularmente relevante o fato de se ter obtido curvas de carga por CMOD bem estáveis para os concretos sem fibras, fundamental para a calibração da energia de fratura na etapa de modelagem computacional.

4.5 MODELAGEM NUMÉRICA

A Tabela 10 lista os parâmetros dos materiais utilizados nas simulações numéricas. O módulo de elasticidade do concreto foi utilizado de acordo com os resultados experimentais, enquanto os parâmetros de interação fibra/matriz, resistência à tração e energia de fratura foram calibrados de acordo com as curvas experimentais obtidas no ensaio de flexão de prisma. Já nos parâmetros da fibra foram utilizadas as informações do fornecedor. Foram desenvolvidos modelos com aproximadamente 11100, 13200 e 15200 graus de liberdade para os concretos com teores de fibras de 20 kg/m³, 35 kg/m³ e 50 kg/m³ respectivamente.

Tabela 10: Parâmetros materiais usados nos modelos numéricos.

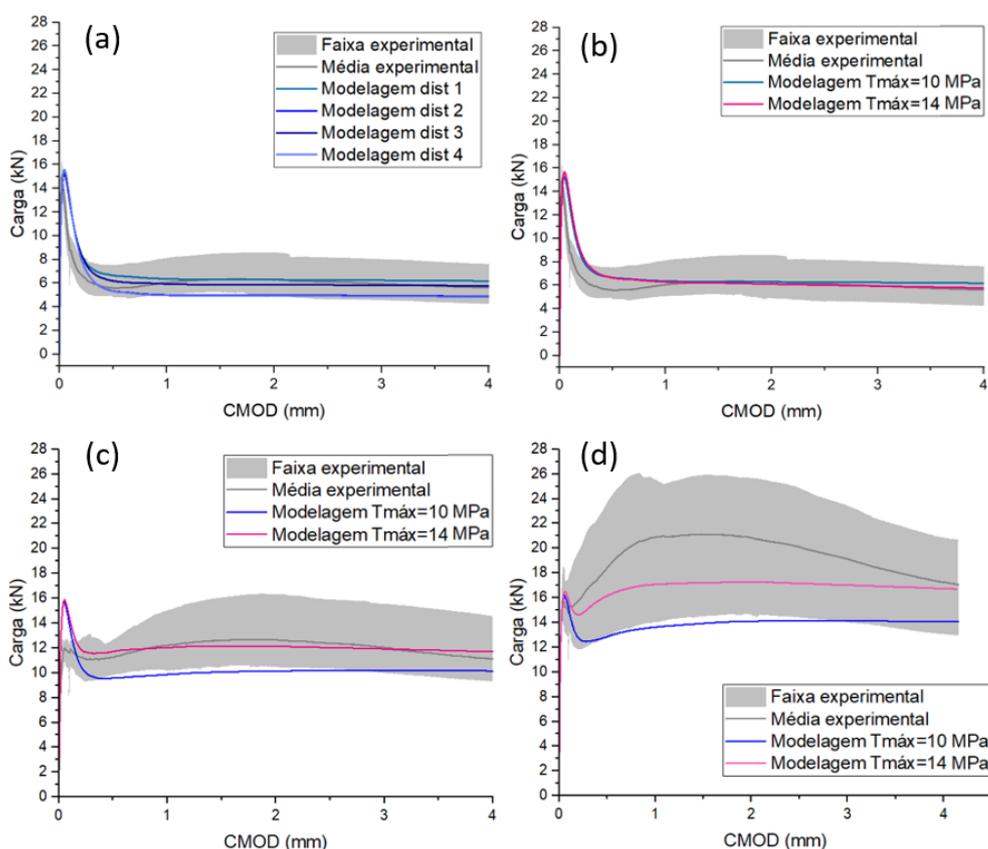
Material	Parâmetros	0% AR			20% AR			50% AR					
		20 FA	35 FA	50 FA	20 FA	35 FA	50 FA	20 FA	35 FA	50 FA			
Macroescala	Parâmetros efetivos $X=X_c.V_c+X_f.V_f$	Módulo de elasticidade \bar{E} (GPa)											
		33	34	34	31	32	32	27	28	28			
		Coeficiente de Poisson ν											
		0.2											
Mesoescala	Interação fibra/concreto	$\tau_{bmáx}$ (MPa)			10			18			18		
		τ_f (MPa)			8			10			10		
		s_1 e s_2 (mm)			0.1 e 6.5								
	Concreto	Resistência à tração f_{tc} (MPa)			2.8			2.5			2.0		
		Módulo de elasticidade E_c (GPa)			33			31			27		
		Coeficiente de Poisson ν						0.2					
		Energia de fratura G_f (N/m)						106					
		Módulo de elasticidade E_f (GPa)						210					
	Fibra de aço	Resistência à tração f_{tf} (MPa)						1225					

*FA=fibra de aço.

Após ensaios experimentais de flexão foi verificado que os resultados das curvas carga por CMOD para os teores de 20 kg/m³ apresentaram resultados mais homogêneos quando comparado aos demais teores de fibras (Figura 33, 34 e 35). Isso ocorre devido a dois fatores: a homogeneidade de distribuição de fibras é mais fácil de se atingir para menores teores de fibra; além disso, as condições de contorno como o atrito entre o cutelo e o corpo de prova pode ser mais intenso para maiores cargas aplicadas. Dessa forma, decidiu-se realizar a calibração do programa numérico tendo como base os resultados da curva carga por CMOD do ensaio de flexão para os teores de 20 kg/m³, variando os parâmetros de interação fibra-matriz para cada teor de agregado reciclado utilizado.

A estratégia utilizada nesse estudo foi a mesma proposta por Trindade *et al.* (2020). Primeiramente, quatro distribuições com o mesmo teor de fibra são geradas. Uma das distribuições (denominada distribuição 1) foi usada para calibrar os parâmetros da interface-fibra matriz, e as demais (distribuições, 2, 3 e 4) foram empregadas para simulações utilizando os mesmos parâmetros da calibração (Figura 33a). Em seguida, a curva que apresentou o resultado mais distante da média experimental (distribuição 4) foi recalibrada ajustando os parâmetros de aderência para representar a curva da média experimental (Figura 33b). Dessa forma, trabalha-se com uma faixa de parâmetros de aderência na falta de ensaios de arrancamento de fibras. Importante destacar que neste estudo essa calibração também considera diferenças de orientação entre as distribuições numéricas e reais, além da utilização de modelos bidimensionais. Por fim, ambos os parâmetros obtidos são usados para simular os ensaios de flexão em 3 pontos para os teores de fibras de 35 kg/m³ (Figura 33c) e 50 kg/m³ (Figura 33d).

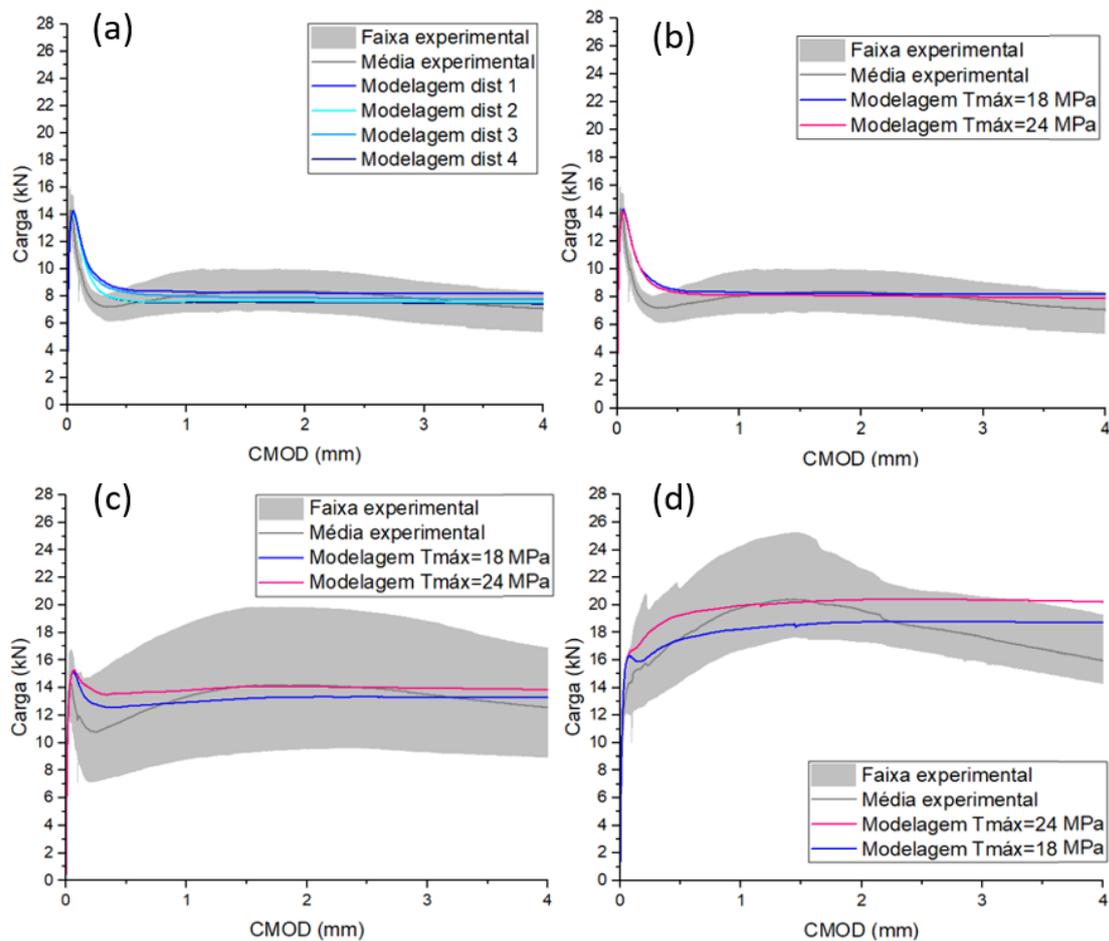
Figura 33: Curvas de Carga vs. CMOD para o CAN (a) com o teor de 20kg/m³ de fibras em 4 distribuições de fibras (b) e distribuições recalibradas, (c) e os teores de 35kg/m³ e (d) 50kg/m³.



Fonte: Própria.

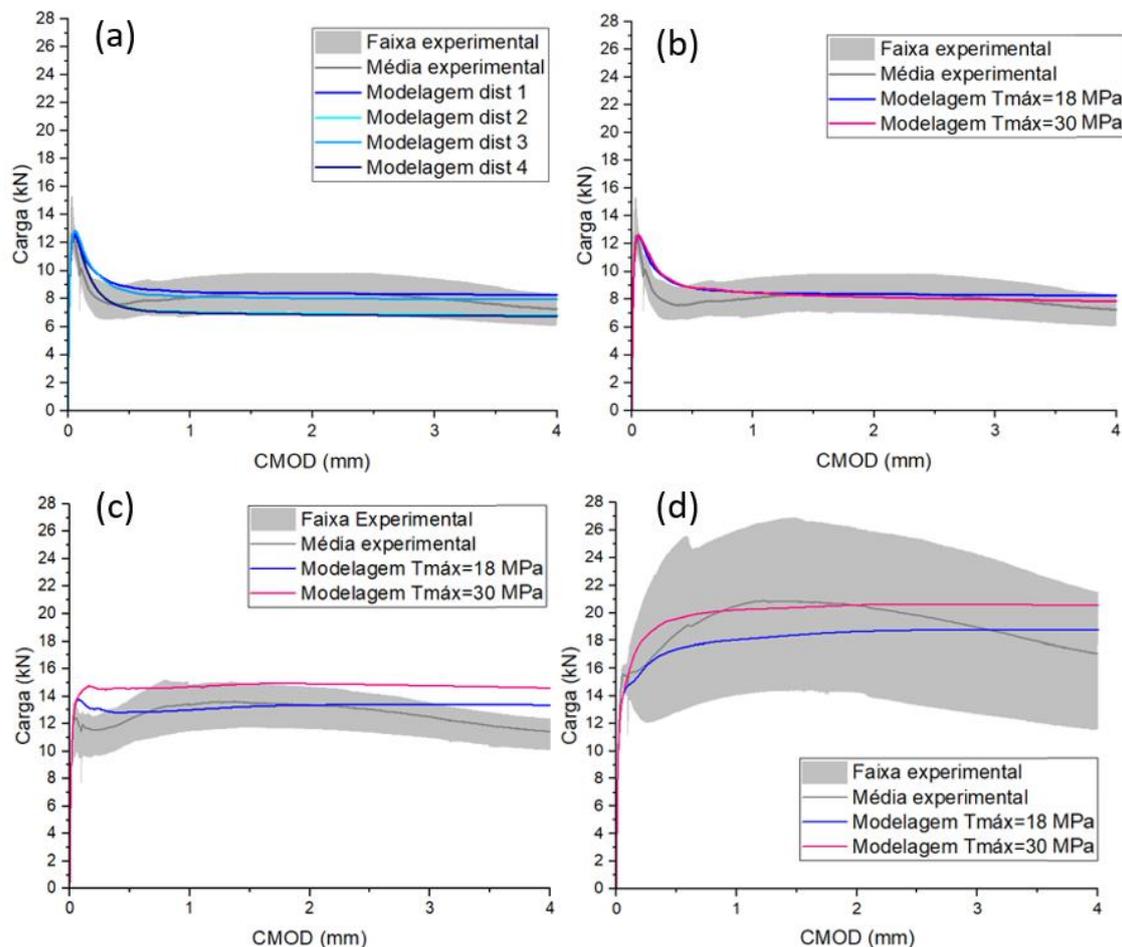
O mesmo procedimento é feito para o concreto com 20% de AR (Figura 34) e para o concreto com 50% de AR (Figura 35).

Figura 34: Carga por CMOD do CAR com 20% de AR (a) com o teor de 20kg/m³ de fibras em 4 distribuições e (b) distribuições recalibradas, e (c) com teores de 35kg/m³ e (d) 50kg/m³.



Fonte: Própria.

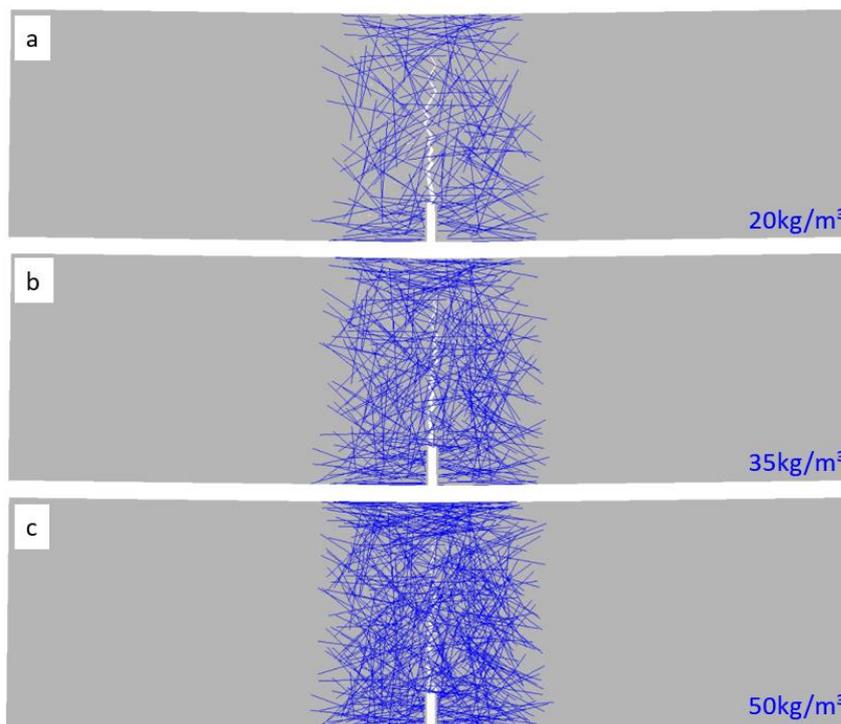
Figura 35: Carga por CMOD do CAR com 50% de AR (a) com o teor de 20kg/m³ de fibras em 4 distribuições e (b) distribuições recalibradas, e (c) com teores de 35kg/m³ e (d) 50kg/m³.



Fonte: Própria.

A figura 36 ilustra um exemplo de distribuição de fibras para cada teor de fibras utilizada no ensaio de flexão de três pontos para o concreto com 20% de AR e com uma abertura de fissura de 2,5mm. O padrão de fissuração foi similar para todas as misturas.

Figura 36: Vigas de concreto com 20% de AR para um CMOD=2,5mm e com teores de fibra de aço de (a) 20 kg/m³, (b) 35 kg/m³ e (c) 50 kg/m³.



Fonte: Própria.

As resistências residuais à flexão f_{R1} e f_{R3} e o a resistência limite (f_L) foram calculadas baseadas tanto nos resultados experimentais como nos resultados numéricos: numérico 1 (Num. 1) e numérico 2 (Num. 2) que consideram o intervalo dos parâmetros de interface obtidos no processo de calibração. Os resultados obtidos para todas as misturas estudadas estão listados na Tabela 11. Como pode ser visto nesta tabela, o requisito $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$ não foi atendido para o teor de fibras de 20 kg/m³ no concreto com agregado natural e, portanto, a armadura convencional não pode ser substituída por fibras de aço para esse caso. O baixo valor desse parâmetro, igual a 0,36, pode estar atrelado ao teor real das fibras que ficou abaixo da quantidade prevista, embora a amostra com o mesmo teor de fibras e com 20% de substituição por AR tenha atendido esse mesmo parâmetro. Já o parâmetro $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,5$ foi atendido em todas as amostras com fibras.

Tabela 11: Resistências limites e residuais obtidas experimentalmente e numericamente.

AR (%)	Teor de fibras (kg/m ³)	Resultados	f_L (Mpa)	f_{R1} (Mpa)	f_{R3} (MPa)	f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}
0	20	Exp.	4,67	1,7	1,86	0,36	1,09
		Num. 1	4,69	2,04	1,93	0,43	0,95
		Num. 2	4,82	2,04	1,85	0,42	0,91
	35	Exp.	3,81	3,57	3,91	0,94	1,10
		Num. 1	4,83	2,95	3,13	0,61	1,06
		Num. 2	4,88	3,6	3,7	0,74	1,03
	50	Exp.	4,98	5,73	6,16	1,15	1,08
		Num. 1	4,98	3,95	4,35	0,79	1,10
		Num. 2	5,04	4,97	5,28	0,99	1,06
20	20	Exp.	4,45	2,27	2,47	0,51	1,09
		Num. 1	4,39	2,61	2,53	0,59	0,97
		Num. 2	4,35	2,56	2,47	0,59	0,96
	35	Exp.	4,47	3,62	4,29	0,81	1,19
		Num. 1	4,65	2,89	4,1	0,62	1,42
		Num. 2	4,66	4,17	4,31	0,89	1,03
	50	Exp.	4,14	5,31	5,5	1,28	1,04
		Num. 1	4,88	5,38	5,78	1,10	1,07
		Num. 2	4,89	5,92	6,28	1,21	1,06
50	20	Exp.	3,76	2,26	2,41	0,60	1,07
		Num. 1	3,85	2,72	2,57	0,71	0,94
		Num. 2	3,87	2,72	2,48	0,7	0,91
	35	Exp.	3,85	3,78	4,09	0,98	1,08
		Num. 1	4,14	3,96	4,12	0,96	1,04
		Num. 2	4,15	4,48	4,57	1,08	1,02
	50	Exp.	4,62	5,53	5,86	1,20	1,06
		Num. 1	4,24	5,35	5,77	1,26	1,08
		Num. 2	4,25	6,01	6,34	1,41	1,05

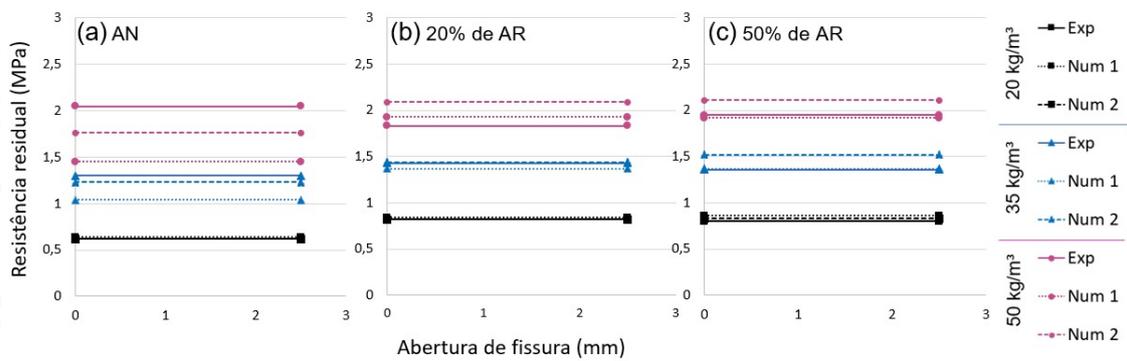
A Tabela 12 mostra os valores de f_{fts} e f_{ftu} considerando tanto o modelo constitutivo linear quanto o rígido-plástico para cada mistura, bem como a variação dos resultados numéricos comparados ao experimentais (Δf_{Ftu} e Δf_{Fts}).

Tabela 12: Parâmetros de dimensionamento no ELS e ELU.

AR (%)	Teor de fibras (kg/m ³)	Resultados	f_{Ftu}	Δf_{Ftu}	f_{Fts}	Δf_{Fts}	f_{Ftu}	Δf_{Ftu}
			(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
			Rígido-plástico		Linear			
0	20	Exp.	0,62	-	0,77	-	0,59	-
		Num. 1	0,64	3	0,92	19	0,56	5
		Num. 2	0,62	0	0,92	19	0,52	12
	35	Exp.	1,30	-	1,61	-	1,24	-
		Num. 1	1,04	20	1,33	17	0,98	21
		Num. 2	1,23	5	1,62	1	1,13	9
50	Exp.	2,05	-	2,58	-	1,93	-	
	Num. 1	1,45	29	1,78	31	1,39	28	
	Num. 2	1,76	14	2,24	13	1,65	15	
20	20	Exp.	0,82	-	1,02	-	0,78	-
		Num. 1	0,84	2	1,17	15	0,74	5
		Num. 2	0,82	0	1,15	13	0,72	8
	35	Exp.	1,43	-	1,63	-	1,42	-
		Num. 1	1,37	4	1,30	20	1,47	4
		Num. 2	1,44	1	1,88	15	1,32	7
50	Exp.	1,83	-	2,39	-	1,69	-	
	Num. 1	1,93	5	2,42	1	1,81	7	
	Num. 2	2,09	14	2,66	11	1,96	16	
50	20	Exp.	0,80	-	1,02	-	0,75	-
		Num. 1	0,86	7	1,22	20	0,74	1
		Num. 2	0,83	4	1,22	20	0,70	7
	35	Exp.	1,36	-	1,70	-	1,29	-
		Num. 1	1,37	1	1,78	5	1,27	2
		Num. 2	1,52	12	2,02	19	1,39	8
50	Exp.	1,95	-	2,49	-	1,82	-	
	Num. 1	1,92	2	2,41	3	1,82	0	
		Num. 2	2,11	8	2,70	8	1,97	8

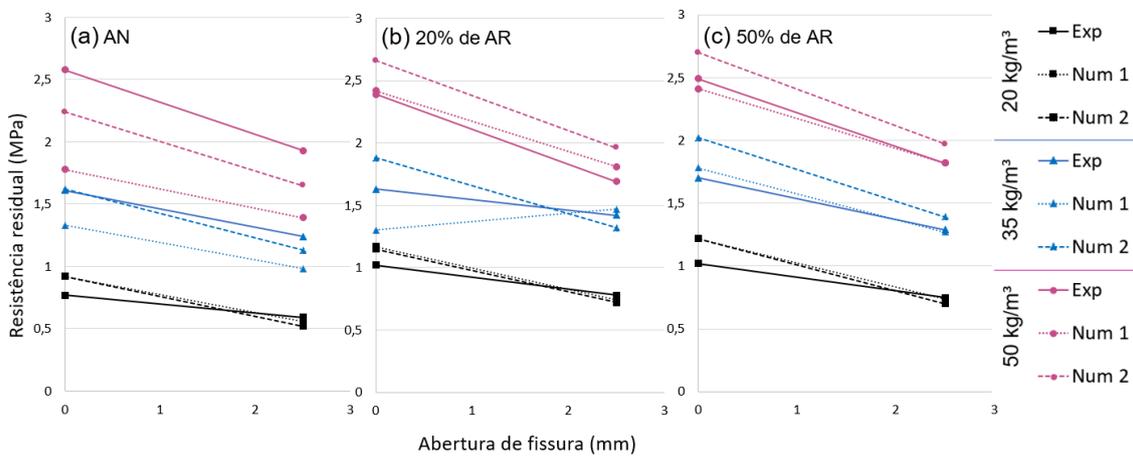
Os resultados numéricos mostraram que o uso de agregado reciclado não influenciou negativamente na previsão do comportamento do concreto, já que o CARRFA mostrou resultados numéricos mais próximos aos resultados experimentais quando comparado ao CRF. Nas Figuras 37 e 38 é possível comparar os modelos constitutivos obtidos por parâmetros numéricos e experimentais, respectivamente para o modelo rígido-plástico e linear. Os modelos numéricos mostram uma boa correlação com os modelos experimentais, principalmente nos concretos com uso de AR.

Figura 37: Modelo constitutivo rígido plástico para os valores de (a) AN, (b) 20% de AR, (c) 50% de AR.



Fonte: Própria.

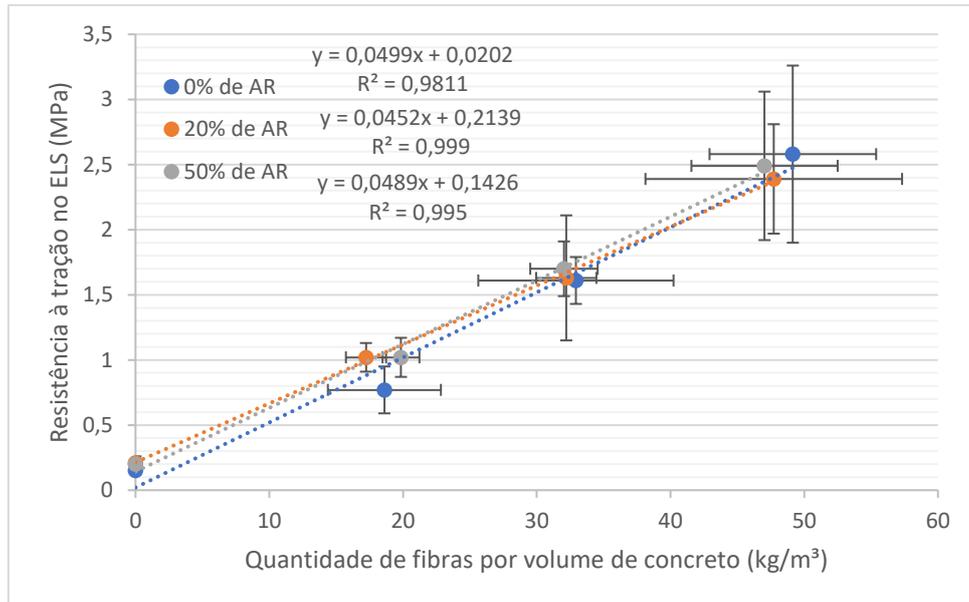
Figura 38: Modelo constitutivo linear para os valores de (a) AN, (b) 20% de AR, (c) 50% de AR.



Fonte: Própria.

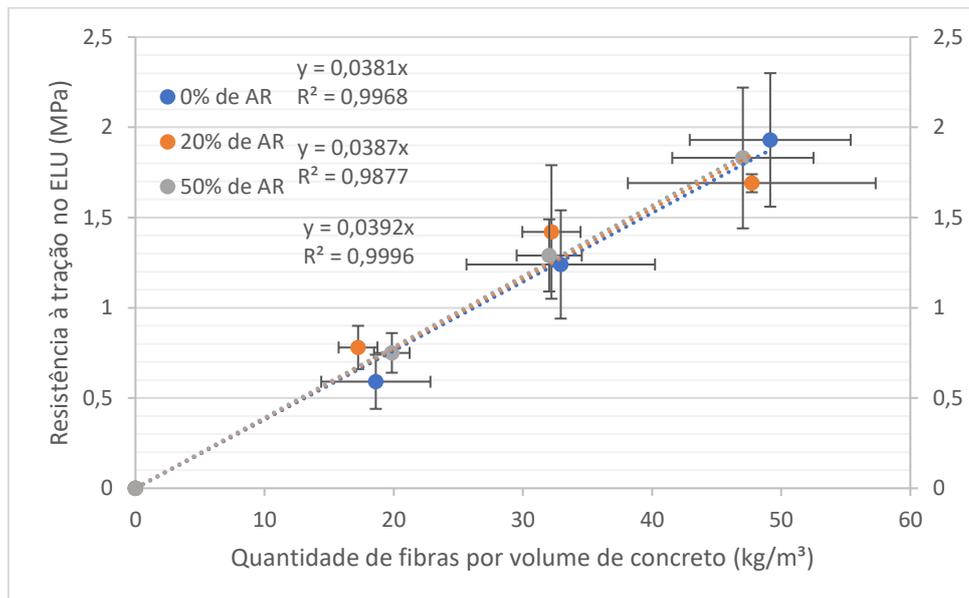
Por último, Na Figura 39 e Figura 40 é possível observar o aumento da tração direta média no ELS e ELU conforme aumenta-se a quantidade de fibra adicionada.

Figura 39: Resistência à tração no ELS.



Fonte: Própria.

Figura 40: Resistência à tração no ELU.

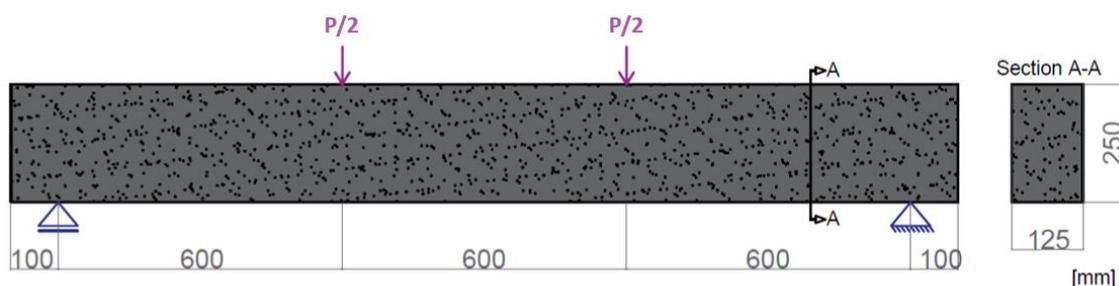


Fonte: Própria.

4.6 APLICAÇÃO DO CARRFA EM UMA VIGA

Nesta seção o CARRFA é aplicado a uma viga, sendo a mesma dimensionada por meio do *fib* Model Code 2010, usando como parâmetros de pós-fissuração os valores experimentais e numéricos listados na Tabela 11 e os parâmetros dos concretos de resistência média à compressão, resistência característica à compressão e módulo de elasticidade listados na Tabela 13. Os valores de resistência característica e módulo de elasticidade foram utilizados de modo a representarem o impacto do uso do agregado reciclado nas misturas. Para isso foi utilizado o programa de dimensionamento desenvolvido por Trindade (2018). A Figura 41 ilustra a geometria e as condições de contorno, com uma força característica “P” de 82kN.

Figura 41: Geometria da viga estudada.



Fonte: Própria.

Tabela 13: Resistência média, característica e módulo de elasticidade dos concretos.

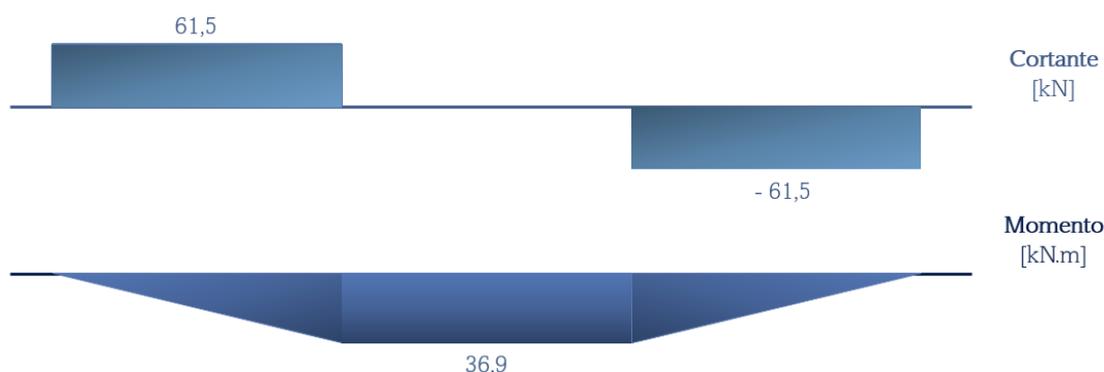
Concreto	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	E (GPa)
AN	45,6	42,7	31,5
20% de AR	43,3	40,8	31,0
50% de AR	40,7	38,5	27,6

Fonte: Própria.

Estado Limite Último

Para o ELU as vigas foram dimensionadas para a flexão e forças cortante com um coeficiente de redução das resistências do aço e do concreto igual a 1. A Figura 42 ilustra os diagramas de cortante e momento para o ELU, após majorar a carga aplicada.

Figura 42: Diagramas de cortante e momento da viga estudada.



Fonte: Própria.

A área da seção transversal necessária de reforço longitudinal A_s foi calculada para a viga de referência, em seguida o efeito da fibra foi considerado para as diversas misturas e a nova área de barra foi calculada por meio da resistência última a tração f_{Ftu} de acordo com a Equação 11.

$$A_s = \frac{M_{Ed} - f_{Ftu} \cdot (h-x) \cdot b_w \cdot \left[\frac{(h-x)}{2} + (x-0.45x) \right]}{f_{yd} \cdot (d-0.45x)} \quad (11)$$

onde " M_{Ed} " é o momento da viga estudada, " h " é a altura da viga, " b_w " é a largura da viga, " x " é a altura da zona comprimida, " d " é a altura útil do reforço em barras e " f_{yd} " é a resistência ao escoamento do aço.

O resultado do reforço longitudinal está apresentado na Tabela 14, assim como o fator de variação que foi calculado para cada viga de CRF e comparado com a viga de referência (ΔA_s).

Tabela 14: Resultados da armadura longitudinal adotada.

AR (%)	Teor de fibras (kg/m ³)	Resultados :	A_s (mm ²)	ΔA_s (%)	A_s (mm ²)	ΔA_s (%)	Armadura adotada
			Modelo Rígido-plástico		Modelo Linear		
		Referência	3.74				2 de 16Ø
0	20	Exp.	-	-	-	-	2 de 16Ø
		Num. 1	-	-	-	-	
		Num. 2	-	-	-	-	
	35	Exp.	3,34	11%	3,36	10%	2 de 16Ø
		Num. 1	3,42	9%	3,44	8%	
		Num. 2	3,36	10%	3,39	9%	
50	Exp.	3,11	17%	3,14	16%	2 de 16Ø	
	Num. 1	3,29	12%	3,31	11%		
	Num. 2	3,20	14%	3,23	14%		
20	20	Exp.	3,51	6%	3,52	6%	2 de 16Ø
		Num. 1	3,50	6%	3,53	6%	
		Num. 2	3,51	6%	3,54	5%	
	35	Exp.	3,32	11%	3,32	11%	2 de 16Ø
		Num. 1	3,34	11%	3,31	11%	
		Num. 2	3,32	11%	3,35	10%	
50	Exp.	3,20	14%	3,24	13%	2 de 16Ø	
	Num. 1	3,17	15%	3,20	14%		
	Num. 2	3,12	17%	3,16	16%		
50	20	Exp.	3,54	5%	3,56	5%	2 de 16Ø
		Num. 1	3,53	6%	3,56	5%	
		Num. 2	3,54	5%	3,57	5%	
	35	Exp.	3,37	10%	3,40	9%	2 de 16Ø
		Num. 1	3,37	10%	3,40	9%	
		Num. 2	3,32	11%	3,36	10%	
50	Exp.	3,19	15%	3,23	14%	2 de 16Ø	
	Num. 1	3,20	14%	3,24	13%		
	Num. 2	3,15	16%	3,19	15%		

É possível notar que embora exista uma redução da taxa de armadura necessária conforme aumenta-se o teor de fibras, não houve uma redução no reforço final de barras, já que em todos os cenários duas barras de 16 mm foram adotadas.

Já os reforços relativos à força cortante foram calculados para duas regiões da viga e estão representados na Tabela 15. A região central, onde a força cortante é nula e apenas um reforço mínimo deve ser providenciado; e na região onde a força cortante é máxima e igual a 61,5kN.

A resistência à cortante fornecida pelo concreto reforçado com fibra de aço é calculada conforme a Equação 12:

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot p_l \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftu,k}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (12)$$

Sendo ' γ_c ' o fator de segurança parcial para as propriedades materiais do concreto e igual a 1, k é um fator que considera o efeito escala, calculado como

$k = 1 + \sqrt{200/d}$ para uma espessura efetiva da seção transversal d , p_l é a razão do reforço longitudinal definido como $p_l = A_{sl}/(b_w \cdot d)$, sendo o A_{sl} a seção transversal da área do reforço, f_{Ftuk} é o valor característico da resistência residual última considerando $w_u = 1.5 \text{ mm}$, f_{ctk} é o valor característico da resistência à tensão, f_{ck} é o valor característico da resistência à compressão, σ_{cp} é a tensão média agindo na seção transversal do concreto para uma força axial e b_w é a menor largura da área tracionada da seção transversal.

Tabela 15: Resultados da armadura necessária para resistir a força cortante.

AR (%)	Teor de fibra (kg/m ³)	Resultados:	Max	Min
	Referência		Ø5 /150	Ø5 /150
0	20	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Ø5 /150
		Num. 2		
	35	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Fibras de aço
		Num. 2		
50	Exp.			
	Num. 1	Fibras de aço	Fibras de aço	
	Num. 2			
20	20	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Fibras de aço
		Num. 2		
	35	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Fibras de aço
		Num. 2		
50	Exp.			
	Num. 1	Fibras de aço	Fibras de aço	
	Num. 2			
50	20	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Fibras de aço
		Num. 2		
	35	Exp.		
		Num. 1	Ø5 /150	Fibras de aço
		Num. 2		
50	Exp.			
	Num. 1	Fibras de aço	Fibras de aço	
	Num. 2			

É importante frisar que o nível de substituição do agregado convencional por agregado reciclado não teve qualquer influência na definição da armadura exigida para as vigas em termos de projeto. Isto acontece mesmo levando em consideração a perda de resistência característica que esta substituição provoca no concreto.

A adição de 50 kg/m³ de fibras de aço permitiu a remoção total do reforço relativo à força cortante para todos os teores de agregado reciclado. Além disso,

nas regiões onde a força cortante é nula, a adição de fibras satisfaz por completo os requisitos de reforço à força cortante para todos os concretos estudados que atenderam o requisito $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$ anteriormente.

Estado Limite de Serviço

No ELS a abertura de fissura e a deflexão são medidas para estimar a durabilidade da estrutura. Nessa seção, a força correspondente ao ELS é igual a 82 kN e a contribuição das fibras de aço é calculada de acordo com a Equação 13 e Equação 14 para a abertura de fissuras e deflexão respectivamente, considerando o modelo linear conforme recomendação normativa. Os resultados desses parâmetros estão apresentados na Tabela 16.

$$w_d = 2 \cdot \left\{ k \cdot c + \frac{1}{4} \frac{\emptyset_s}{\rho_{s,ef}} \cdot \frac{f_{ctm} - f_{Ftsm}}{\tau_{bm}} \right\} \cdot \left(\frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \varepsilon_{sh} \right) \quad (13)$$

onde 'k' é um parâmetro empírico para considerar a cobertura do concreto (para simplificação de cálculos, $k = 1$ foi assumido), 'c' é o cobrimento do concreto, ' \emptyset_s ' é o diâmetro nominal da barra de reforço, $\rho_{s,ef}$ é a razão do reforço efetivo dado por $\rho_{s,ef} = A_s/A_{c,ef}$, sendo $A_{c,ef}$ a área efetiva tensionada do concreto, f_{ctm} o valor médio da resistência à tensão axial, f_{Ftsm} o valor médio de resistência a tensão residual de serviço, τ_{bm} é a aderência média entre o aço e o concreto, σ_s é a resistência à tração do reforço calculado para uma determinada abertura da fissura, σ_{sr} é a resistência à tração do reforço calculado para as condições de carga da primeira fissura, E_s é o módulo de elasticidade do aço, β é um coeficiente empírico, η_r é o coeficiente de contribuição da retração e ε_{sh} é a tensão de retração.

$$\delta = \zeta \cdot \delta_{11} + (1 - \zeta) \cdot \delta_1 \quad (14)$$

Sendo ζ é o coeficiente de interpolação e é dado por $\zeta = 1 + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}\right)^2 \delta_1$, sendo β o coeficiente da influência da duração do carregamento, δ_1 é a deflexão assumindo o momento de área da seção do concreto não fissurada, δ_{11} é a deflexão usando o momento de área da seção do concreto totalmente fissurada.

Tabela 16: Resultados de abertura de fissura e deflexão.

AR (%)	Teor de fibras (kg/m ³)	Resultados:	w_d (mm)	Δ_{w_d} (%)	δ_{SLS} (mm)	$\Delta_{\delta SLS}$ (%)	
	Referência		0,22	-	4,09	-	
0 (AN)	20	Exp.	0,18	18%	3,86	6%	
		Num. 1	0,17	23%	3,81	7%	
		Num. 2	0,17	23%	3,81	7%	
	35	Exp.	0,14	36%	3,58	12%	
		Num. 1	0,15	32%	3,67	10%	
		Num. 2	0,14	36%	3,57	13%	
	50	Exp.	0,10	55%	3,27	20%	
		Num. 1	0,13	41%	3,52	14%	
		Num. 2	0,11	50%	3,37	18%	
	20	20	Exp.	0,17	23%	3,80	7%
			Num. 1	0,18	18%	3,86	6%
			Num. 2	0,16	27%	3,75	8%
35		Exp.	0,14	36%	3,59	12%	
		Num. 1	0,18	18%	3,86	6%	
		Num. 2	0,13	41%	3,51	14%	
50		Exp.	0,11	50%	3,35	18%	
		Num. 1	0,14	36%	3,57	13%	
		Num. 2	0,10	55%	3,27	20%	
50		20	Exp.	0,17	23%	3,94	4%
			Num. 1	0,16	27%	3,87	5%
			Num. 2	0,16	27%	3,87	5%
	35	Exp.	0,14	36%	3,72	9%	
		Num. 1	0,13	41%	3,69	10%	
		Num. 2	0,12	45%	3,62	11%	
	50	Exp.	0,10	55%	3,47	15%	
		Num. 1	0,11	50%	3,50	14%	
		Num. 2	0,10	55%	3,41	17%	

Os resultados mostram uma redução tanto na abertura de fissura quanto na deflexão com a adição de fibras de aço, com uma redução máxima de 45 % e 17 % respectivamente para os resultados experimentais com 50 kg/m³ de fibras. Além disso, os resultados numéricos mostraram uma boa correlação com os resultados experimentais.

O comportamento das vigas foi similar no ELS independente do teor de substituição de agregado natural por reciclado. Nessas condições, o uso integrado de fibra de aço e agregado reciclado no concreto pode minimizar os impactos negativos do AR na durabilidade dos elementos estruturais (KAPLAN et al. 2021; ALI et al. 2021). Ou seja, a avaliação do comportamento do elemento estrutural em termos de durabilidade pode não ter o mesmo efeito que o comportamento observado apenas na avaliação do material sem aplicação específica. Nesse sentido, outros aspectos devem ser estudados futuramente considerando o elemento estrutural, como por exemplo a fluência. O aumento da

taxa de fluência causada pelo uso de AR pode não ter a mesma proporção no elemento estrutural como tem no material (ZHAO et al., 2023).

5. CONCLUSÕES

Nesse estudo verificou-se a viabilidade do uso de agregados reciclados em elementos estruturais fletidos, principalmente em situações em que a utilização de fibras de aço já é prevista. Nessa situação, a redução das propriedades mecânicas do material causada pela utilização de agregado reciclado é menos significativa, visto que, com o uso de fibras, foi notada uma menor redução do pico de resistência limite (f_L) ao se utilizar agregado reciclado. Além disso, como o padrão de fissuração é reduzido com a utilização das fibras, sugere-se que o uso do conjunto possa ser um minimizador da ação negativa dos agregados reciclados em termos de durabilidade.

A caracterização do concreto que gerou o agregado reciclado se mostrou importante para efeito de comparação com outros trabalhos, principalmente aqueles que também utilizam a condição crítica de implementar um agregado de concreto de resistência menor que a da matriz cimentícia.

A respeito da metodologia utilizada pode-se destacar que o método de dosagem utilizada neste trabalho para determinação do concreto de referência se mostrou eficiente, sendo possível a obtenção do traço desejado de maneira rápida e com pouco uso de matéria prima.

A utilização do CARRFA encontra algumas limitações a respeito da trabalhabilidade já que uma quantidade significativa de fibras afetou o abatimento do concreto quando 50 % de AR foi utilizado. Entretanto, esse efeito não foi observado para uma taxa de substituição de agregado natural por reciclado em 20 %. Já a respeito das propriedades endurecidas, a quantidade de fibra adicionada não exerceu influência na resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica, índice de vazios e absorção de água.

A realização do ensaio de massa unitária também se mostrou relevante para um melhor entendimento do empacotamento das partículas, já que a porcentagem de substituição de AN por AR pode tanto facilitar como prejudicar o empacotamento. Nesse sentido, para garantir o melhor empacotamento e condições de trabalhabilidade para cada dosagem recomenda-se que os próximos trabalhos façam o ajuste do aditivo de maneira a se padronizar o abatimento do concreto e se obter maior confiança nos resultados. Além disso, o ensaio indutivo realizado permitiu uma grande confiabilidade e melhor

entendimento dos resultados experimentais obtidos, explicando também a maior variabilidade de respostas quando se aumenta o teor teórico de fibras de aço.

Foi observado que o modelo numérico pode ser usado para simular o comportamento das vigas e ajudar no processo de tomada de decisões, já que o dimensionamento utilizando parâmetros numéricos apresentou boa correlação com o dimensionamento utilizando os parâmetros experimentais. Além disso, concretos com agregado reciclado mostraram resultados numéricos mais próximos dos experimentais quando comparado ao concreto com agregado natural.

A respeito do elemento estrutural de CARRFA notou-se que o AR não influenciou na resistência residual da viga sujeita à flexão, mesmo com a redução das demais propriedades mecânicas do material. Como consequência, não houve alteração na armadura resultante do dimensionamento das vigas em função do teor de substituição do agregado gráúdo convencional por reciclado. Os resultados experimentais e numéricos mostraram ainda que o teor de fibras no concreto pode ser dosado para o ELS e ELU independentemente do teor de agregado reciclado empregado.

No ELU, embora as fibras de aço não tenham reduzido o reforço longitudinal adotado para a viga estudada, as mesmas foram capazes de reduzir a taxa de armadura necessária determinada em projeto. Além disso, as fibras de aço permitiram a remoção de toda a armadura relativa ao esforço de força cortante para um teor de fibra de 50 kg/m³ em todos os concretos. Por último, as fibras de aço possibilitaram também a retirada da armadura na região central da viga de cortante mínima para todos os teores utilizados.

Já no ELS, a utilização do CARRFA na viga estudada se mostrou superior ao uso do concreto com AN sem fibras na redução da abertura de fissura e da deflexão. Isso pode ser considerado um efeito atenuante dos impactos negativos do uso de CAR na durabilidade do elemento estrutural. Entretanto, estudos aprofundados devem ser realizados no futuro focando no comportamento do material estrutural. Dessa forma, fica claro que o impacto relativo da fibra no comportamento do elemento estrutural é muito mais significativo do que o uso de agregados reciclados.

5.1 Recomendações para pesquisas futuras

Destaca-se que os resultados deste estudo podem servir de referência inicial para o dimensionamento de outros elementos estruturais, além de motivarem pesquisas futuras considerando maiores teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, bem como a utilização de outros tipos de agregado reciclado de concreto e outros tipos de fibras de aço.

Em relação a modelagem numérica, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo que considere tanto os agregados quanto as fibras representadas de maneira explícita, para que fatores como a aderência da fibra possam ser estudados em conjunto com as propriedades das zonas de transição de interface da matriz com o agregado.

Como continuidade desse trabalho recomenda-se ensaios experimentais e modelagem numérica da viga em tamanho real estudada na seção 4.6 desse trabalho. Sugere-se também a utilização de algoritmos de geração de fibras de aço que considere a direção das fibras no elemento estrutural conforme procedimento de moldagem.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acessado em: 25 de março de 2021.

ANDREU, G.; MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v52, p 227-235, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5739**: Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 8522**: Concreto. Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento portland. Requisitos e métodos e ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16935**: Projetos de estruturas de concreto reforçado com fibras. Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR NM30**: Agregado miúdo. Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM45**: Agregados. Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM52**: Agregado miúdo. Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM53**: Agregado graúdo. Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM248**: Agregados. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

ALI, B. Development of environment-friendly and ductile recycled aggregate concrete through synergetic use of hybrid fibers. *Environ Sci Pollut Res* 29, 34452–34463 (2022).

ANIKE E. E.; SAIDANI, M.; OLUBANWO, A. O.; ANYA, U.C. Flexural performance of reinforced concrete beams with recycled aggregates and steel fibres. **Structures**, v.39, p. 1264- 1278, 2022.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção – Vol. 1**. Editora LTC. 6ª ed. Capítulo 4. 2019.

BITENCOURT, L. A. G. **Numerical modeling of failure processes in steel fiber reinforced cementitious materials**. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BITENCOURT, L. A. G.; MANZOLI, O. L.; PRAZERES, P. G. C.; RODRIGUES, E. A.; BITTENCOURT, T. N. A coupling technique for non-matching finite element meshes. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 290, p. 19-44, 2015.

BITENCOURT, L. A. G.; MANZOLI, O. L.; BITTENCOURT, T. N.; VECCHIO F. J. Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. **International Journal of Solids and Structures**, v. 159, p. 171–190, 2019.

CAVALARO, S.H.P., LÓPEZ, R., TORRENTS, J.M. et al. Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC. **Materials and Structures**, v. 48, p. 1859–1873, 2014.

CHAN, R. et al. Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 183–191, 2019.

CHAN, R.; LIU, X.; GALO BARDES, I. Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118186, 2020.

Cunha V. **Steel fibre reinforced self-compacting concrete – from micromechanics to composite behaviour**. Tese - Departamento de Engenharia Civil, University of Minho, Portugal, 2010.

DAMINELLI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*. Volume 32, Issue 8, P. 555-562. 2010.

DE BORST, R., REMMERS, J. J. C., NEEDLEMAN, A., ABELLAN, M. Discrete vc smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 28, p. 583-607, 2004.

DE BRITO, J.; SAIKIA, N. *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer Publishing. 233 Spring Street, New York, USA. 2013.

DI PRISCO, M.; COLOMBO, M.; DOZIO, D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: Principles, models and test validation. **Structural Concrete**, v. 14, n. 4, p. 342–361, 2013.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: New design perspectives. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 9, p. 1261–1281, 2009.

ELAVARASAN, S.; POORNIMA, S.; PRIYA, A.K. Steel fiber on the recycled aggregate hardened properties of concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 68, p. 2159-2162, 2022.

EN 14651. Test method for metallic fibre concrete: **Measuring** the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), Norma Européia, 2007.

ETSE, G., CAGGIANO, A., & VRECH, S. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. **International Journal of Fracture**. v 178, p. 131-146, 2012

FERRARA, L.. Tailoring the orientation of fibres in high performance fibre reinforced cementitious composites: part 1 - experimental evidence, monitoring and prediction. **International Journal of Materials and Structural Integrity**. v. 9, p. 72-91, 2015.

fib Bulletin 55, Model Code 2010. First complete draft, v. 1, 2010, 312p.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. Tese livre docência - Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural. **Congresso Brasileiro de Concreto**, n. 1, p. 1–19, 2014.

FIGUEIREDO, A.D.; MONTE, R.; BITENCOURT JR., L.A.G. Capítulo 36 - Concreto com Fibras. In: IBRACON. – Instituto Brasileiro do Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia. 3ªed.São Paulo, v.2, p. 1523-1560, 2022.

FIGUEIREDO, A. D.; PIETRA, I.; BITENCOURT JR., L. A. G. Influence of Low Content of Steel Fibre on Concretes Produced With Recycled Coarse Aggregates With Different Levels of Density. n. 1, p. 250–258, 2018.

FURIAN, B.O.; PIMENTEL, L.L.; FORTI, N.C.S; JACINTHO, A.E.P.G.A. Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e adição de fibras de aço e de vidro AR. *Revista Matéria*. 2022.

GAO, D.; ZHANG, L. Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 126–136, 2018.

GAO, D.; ZHANG, L.; NOKKEN, M. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. **Cement and**

Concrete Composites, v. 79, p. 1-8, 2017.

GAO, D., ZHANG, L., ZHAO, J., & YOU, P. Durability of steel fibre-reinforced recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 232, n. 117119, 2020.

GIMENES, M; RODRIGUES, E. A.; MAEDO, M.A.; BITENCOURT, L. A. G.; MANZOLI, O. L. 2D Crack Propagation in High-Strength Concrete Using Multiscale Modeling. **Multiscale Science and Engineering**, v. 2, n. 2–3, p. 169–188, 2020.

GIMENES, M; RODRIGUES, E. A.; BITENCOURT, L. A. G.; MANZOLI, O. L. 2D mesoscale modelling of compressive fracture in concrete using a mesh fragmentation technique. **International Journal of Solids and Structures**, v. 261, n. 112031, 2023.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, SP, 1995

IPEA. Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2017.

KANG, W.; RAMESH, R. B.; MIRZA, O.; SENARATNE, S.; TAM, V.; WIGG, D. Reliability based design of RC beams with recycled aggregate and steel fibres. **Structures**, v.11, p. 135-145, 2017.

KAPLAN, G., BAYRAKTAR, O. Y., GHOLAMPOUR, A., GENGE, O., KOKSAL, F., & OZBAKKALOGLU, T. Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. **Structural Concrete**, 2021.

LANGER, W.H., ARBOGAST, B.F. Environmental impacts of mining natural aggregate. *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security*. Springer, p. 151–169, 2002.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China Part II: Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p. 107-112, 2009.

LI, X.; PEI, S.; FAN, K.; GENG, H.; LI, F. Bending Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Based on Composite-Recycled Aggregate and Matched with 500 MPa Rebars. *Materials*, 13, 930, 2020.

LÓPEZ, C. M., CAROL, I., AGUADO, A. Meso-structural study of concrete fracture using interface elements. I: numerical model and tensile behavior. **Materials and Structures**, v. 41, p. 583-599, 2008.

LÓPEZ, R. D. **Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas.** Tesis de máster Ingeniería Estructural y de la Construcción. Escola de Camins, Barcelona, Espanha, 2013.

MANZOLI, O. L.; GAMINO, A. L.; RODRIGUES, E. A.; CLARO, G. K. S. Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio. **Computers and Structures**, v. 95, p. 70-82, 2012.

MANZOLI, O. L.; MAEDO, M. A.; BITENCOURT Jr, L. A. G.; RODRIGUES, E. A. On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 153, p. 151–170, 2016.

MARINKOVIĆ, S. et al. Environmental assessment of green concretes for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 633–649, 2017.

MARINKOVIĆ, S.; JOSA, I.; BRAYMAND, S.; TOSIC, N. Sustainability assessment of recycled aggregate concrete structures: A critical view on the current state-of-knowledge and practice. **Structural Concrete**, v.24, p. 1956-1979, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª ed. São Paulo, 2014.

MENEGAKI, M., DAMINGOS, D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* V. 13, p. 8–15, 2018.

MINEIRO, M. L. R., MONTE, R., MANZOLI, O. L., BITENCOURT, L. A. G. An integrated experimental and multicase numerical methodology for modeling pullout of hooked-end steel fiber from cementitious matrix, v. 344, n. 128215, 2022.

NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 965-971, 2004.

NAZARIMOFRAD, E.; SHAIKH, F. U. A.; NILI, M. Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 6, n. 1, p. 54–68, 2017.

NGUYEN, W.; MARTINEZ, D. M.; JEN, G.; DUNCAN, J. F.; OSTERTAG, C. P. Interaction between global warming potential, durability, and structural properties of fiber-reinforced concrete with high waste materials inclusion. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 169, n. 105453, 2021.

OLIVER, J., HUESPE, A. E. Theoretical and computational issues in modelling material failure in strong discontinuity scenarios. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 193, p. 2987-3014, 2004.

OLIVER, J., LINERO, D. L., HUESPE, A. E., & MANZOLI, O. L. Two-dimensional modeling of material failure in reinforced concrete by means of a continuum strong discontinuity approach. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 197, p. 332-348, 2008.

OUYANG, K.; LIU, J.; LIU, S.; SONG, B.; GUO H.; LI, G.; SHI, C. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on performance of recycled concrete: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 188, n. 106717, 2023.

PIETRA, I. **Avaliação do concreto com agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reforçados com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRAZERES, P. G. C.; BITENCOURT Jr, L. A. G.; BITTENCOURT, T. N.; MANZOLI, O. L. A modified implicit-explicit integration scheme: an application to elastoplasticity problems. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, p. 151-161, 2016

RADTKE, F. K. F., SIMONE, A., & SLUYS, L. J. A computational model for failure analysis of fibre reinforced concrete with discrete treatment of fibres. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 77, p. 597-620, 2010.

RAMESH, R. B., MIRZA, O., & KANG, W.-H. Mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, v. 20, p. 745-755, 2018.

REVILLA-CUESTA, V.; FIOL, F.; PERUMAL, P.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M. Using recycled aggregate concrete at a precast-concrete plant: A multi-criteria company-oriented feasibility study. **Journal of Cleaner Production**, v. 373, n. 133873, 2022.

RODRIGUES, E. A.; MANZOLI, O. L.; BITENCOURT JR., L. A. G.; BITTENCOURT, T. N. 2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio. *International Journal of Solids and Structures*, v. 94-95, p. 112-124, 2016.

RODRIGUES, E. A.; MANZOLI, O. L.; BITENCOURT JR., L. A. G.; BITTENCOURT, T. N.; SÁNCHEZ, M. An adaptative concurrent multiscale model for concrete based on coupling finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 328, p. 26-46, 2018.

RODRIGUES, E. A., MANZOLI, O. L., & BITENCOURT, L. A. G. 3D concurrent multiscale model for crack propagation in concrete. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 361, n. 112813, 2020.

SANTOS, W. F. et al. Roughness, wettability and water absorption of water

repellent treated recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 502–513, 2017.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., & GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 144, p. 2-26, 2018.

SENARATNE, S. et al. The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2318–2327, 2016.

SILVA, R. V., de BRITO, J., & DHIR, R. K.. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, 65, 201–217. 2014.

SILVA, A. P et al. Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto reforçadas com fibras de aço: Previsão de projeto e simulação numérica. **61º Congresso Brasileiro de Concreto**, 2019.

SOUZA, F. S., MENDES, J. C., MORAIS, L. J. B., SILVA, J. S., PEIXOTO, R. A. F. Mapping and Recycling proposal for the construction and demolition waste generate in Brazilian Amazon. **Resources Conservation and Recycling**, v. 176, n. 105896, 2022.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, p. 82-101, 2007.

TAM, V. W. Y.; WATTAGE, H.; LE, K. N. BUTERAA, A.; SOOMRO, M. Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 270, n. 121490, 2020.

TORRENTS, J.M., BLANCO, A., PUJADAS, P. et al. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. **Materials and Structures**, v. 45, p. 1577–1592 (2012).

TRINDADE, Y. T. **Numerical modeling of post-cracking behavior of SFRC and its application on design of beams according to fib Model Code 2010**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

TRINDADE, Y. T.; BITENCOURT Jr., L., A., G.; MONTE, R.; MANZOLI, O., L. Design of SFRC members aided by a multiscale model: Part I – Predicting the post-cracking parameters. **Composite Structures**, v. 241, n. February, p. 112078, 2020.

TRINDADE, Y. T.; BITENCOURT Jr., L., A., G.; MANZOLI, O., L. Design of SFRC members aided by a multiscale model: Part II – Predicting the behavior of RC-SFRC beams. **Composite Structures**, v. 241, n. February, p. 112079, 2020.

ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A.; ARSLAN, V. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, v. 172, p. 1190-1197, 2017.

United Nation. Sustainable Development Goals. Department of Economic and Social Affairs. Available on: "<https://sdgs.un.org/goals>". Accessed on June 30, 2023.

VIEIRA, L. B. P. ; FIGUEIREDO, A. D. ; MORIGGI, T. ; JOHN, V. M. . Waste generation from the production of ready-mixed concrete. *WASTE MANAGEMENT*, v. 94, p. 146-152, 2019

VIEIRA, L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D.; JOHN, V.M. Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. *Journal of Building Engineering*. v.31, p.101408, 2020

WANG, B., YAN, L., FU, Q., & KASAL, B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, 171, 105565, 2021.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2047-2052, 2009.

ZHANG, P.; WANG, C.; GAO, Z.; WANG, F. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 67, n. 105975, 2023.

ZHANG, W. et al. Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 601–607, 2019.

APÊNDICE A- Resultados brutos dos ensaios indutivos

TEOR AR	TEOR FIBRA	CP	C (kg/m ³)	Cz (%)	Cx (%)	Cy (%)
0% (AN)	20kg/m ³	1D	23,90	36,08%	23,04%	40,88%
		1E	25,82	39,82%	24,09%	36,09%
		2D	16,82	38,47%	21,66%	39,88%
		2E	13,55	36,89%	24,61%	38,50%
		3D	15,39	37,47%	24,77%	37,77%
		3E	16,40	39,13%	23,45%	37,42%
		4D	19,20	37,54%	22,13%	40,33%
		4E	17,77	35,20%	26,14%	38,66%
	média:		18,61	37,6%	23,7%	38,7%
	desvio padrão:		4,23	1,5%	1,5%	1,6%
	35kg/m ³	1D	42,27	37,32%	27,61%	35,07%
		1E	36,35	36,02%	26,53%	37,46%
		2D	31,55	38,67%	23,18%	38,14%
		2E	28,67	35,18%	30,27%	34,54%
		3D	22,07	36,28%	24,81%	38,91%
		3E	24,83	38,87%	22,03%	39,09%
		4D	39,36	34,79%	25,61%	39,59%
		4E	38,37	35,64%	24,17%	40,19%
	média:		32,93	36,6%	25,5%	37,9%
	desvio padrão:		7,30	1,5%	2,6%	2,1%
	50kg/m ³	1D	52,87	35,85%	24,29%	39,85%
		1E	54,40	37,15%	23,42%	39,44%
		2D	49,37	35,36%	26,80%	37,83%
		2E	59,39	39,06%	22,92%	38,02%
		3D	41,16	37,00%	27,85%	35,15%
		3E	48,76	37,59%	24,65%	37,76%
		4D	43,13	32,46%	27,29%	40,25%
		4E	44,13	35,24%	26,62%	38,14%
	média:		49,15	36,2%	25,5%	38,3%
	desvio padrão:		6,23	2,0%	1,9%	1,6%

TEOR AR	TEOR FIBRA	CP	C (kg/m ³)	Cz (%)	Cx (%)	Cy (%)
20%	20kg/m ³	1D	16,78	34,15%	27,15%	38,71%
		1E	17,49	34,25%	28,18%	37,58%
		2D	16,93	32,19%	30,75%	37,05%
		2E	20,01	31,57%	28,86%	39,57%
		3D	18,11	33,87%	24,65%	41,48%
		3E	17,52	38,55%	26,75%	34,70%
		4D	18,13	33,13%	27,57%	39,30%
		4E	15,33	34,57%	29,27%	36,16%
		5D	17,44	32,89%	29,07%	38,04%
		5E	14,61	35,87%	30,71%	33,42%
	média:		17,23	34,1%	28,3%	37,6%
	desvio padrão:		1,50	2,0%	1,9%	2,4%
	35kg/m ³	1D	30,92	34,51%	26,66%	38,83%
		1E	30,82	34,43%	28,35%	37,22%
		2D	32,52	36,89%	26,98%	36,13%
		2E	30,10	34,97%	27,05%	37,98%
		3D	33,88	38,27%	26,98%	34,76%
		3E	29,10	34,98%	24,55%	40,47%
		4D	36,81	38,38%	27,69%	33,93%
		4E	31,99	38,88%	28,85%	32,27%
		5D	31,82	35,42%	28,05%	36,53%
		5E	34,14	35,74%	27,27%	36,99%
	média:		32,21	36,2%	27,2%	36,5%
	desvio padrão:		2,25	1,7%	1,2%	2,4%
	50kg/m ³	1D	57,38	36,08%	27,05%	36,87%
		1E	56,09	35,32%	26,22%	38,45%
		2D	45,94	36,48%	25,02%	38,50%
		2E	55,47	37,60%	22,48%	39,92%
		3D	62,52	36,19%	23,03%	40,78%
		3E	47,23	34,35%	27,59%	38,06%
		4D	36,53	36,43%	24,23%	39,33%
		4E	38,27	35,96%	26,44%	37,60%
		5D	36,42	34,10%	31,17%	34,73%
5E		41,38	33,94%	24,15%	41,91%	
média:		47,72	35,6%	25,7%	38,6%	
desvio padrão:		9,59	1,2%	2,6%	2,0%	

TEOR AR	TEOR FIBRA	CP	C (kg/m ³)	Cz (%)	Cx (%)	Cy (%)
50%	20kg/m ³	1D	20,06	35,42%	28,88%	35,70%
		1E	19,35	35,67%	26,41%	37,91%
		2D	20,03	36,03%	28,25%	35,73%
		2E	21,00	36,01%	28,39%	35,59%
		3D	18,65	34,06%	27,31%	38,63%
		3E	19,79	37,54%	23,91%	38,55%
		4D	21,72	36,28%	26,34%	37,37%
		4E	17,91	35,55%	26,94%	37,51%
		5D	21,83	38,62%	25,44%	35,95%
		5E	18,16	37,21%	26,61%	36,18%
	média:		19,85	36,2%	26,8%	36,9%
	desvio padrão:		1,38	1,3%	1,5%	1,2%
	35kg/m ³	1D	35,54	36,84%	25,44%	37,72%
		1E	33,18	37,03%	26,49%	36,48%
		2D	30,74	35,01%	26,48%	38,51%
		2E	31,04	37,15%	23,10%	39,76%
		3D	35,56	36,25%	26,22%	37,53%
		3E	30,58	34,41%	26,51%	39,08%
		4D	31,34	34,10%	31,35%	34,55%
		4E	27,63	34,90%	27,80%	37,30%
		5D	34,15	37,92%	29,40%	32,68%
		5E	30,61	36,00%	22,23%	41,77%
	média:		32,04	36,0%	26,5%	37,5%
	desvio padrão:		2,52	1,3%	2,7%	2,6%
	50kg/m ³	1D	45,13	36,23%	25,33%	38,44%
		1E	57,11	36,93%	26,05%	37,03%
		2D	42,96	36,10%	26,62%	37,28%
		2E	52,72	38,37%	25,63%	36,00%
		3D	47,10	37,39%	27,50%	35,11%
		3E	52,88	38,14%	24,64%	37,22%
		4D	40,16	36,87%	23,98%	39,16%
		4E	46,29	36,54%	25,73%	37,73%
		5D	42,63	38,08%	25,42%	36,50%
5E		43,34	37,44%	22,60%	39,96%	
média:		47,03	37,2%	25,3%	37,4%	
desvio padrão:		5,47	0,8%	1,4%	1,5%	

APÊNDICE B – Resultados brutos dos ensaios de flexão em 3 pontos.

Amostra	Exemplar	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)	f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}
Concreto Base	CV-1	2,84	0,12	*	*	*	0,04	**
	CV-2	2,97	0,19	0,01	*	*	0,06	**
	CV-3	2,77	0,18	*	*	*	0,06	**
	Média:	2,86	0,16	0,01	**	**	0,06	**
	Desv.P:	0,1	0,04	**	**	**	0,01	**
Sem fibras AN	N0-1	5,08	0,32	0,02	*	*	0,06	**
	N0-2	5,13	0,41	0,02	*	*	0,08	**
	N0-3	5,11	0,28	*	*	*	0,05	**
	Média:	5,11	0,34	0,02	**	**	0,07	**
	Desv.P:	0,03	0,07	0,00	**	**	0,01	**
20kg/m ³ de FA AN	N20-1	5,00	2,31	2,61	2,50	2,37	0,46	1,08
	N20-2	4,81	1,49	1,62	1,44	1,35	0,31	0,97
	N20-3	4,32	1,50	1,87	1,88	1,73	0,35	1,25
	N20-4	4,54	1,51	1,61	1,61	1,51	0,33	1,07
	Média:	4,67	1,70	1,93	1,86	1,74	0,36	1,09
Desv.P:	0,30	0,41	0,47	0,47	0,45	0,07	0,12	
35kg/m ³ de FA AN	N35-1	3,96	3,75	3,74	3,65	3,36	0,94	0,97
	N35-2	3,54	3,16	3,39	3,31	3,06	0,89	1,05
	N35-3	3,90	3,32	3,73	3,64	3,27	0,85	1,10
	N35-4	3,83	4,03	5,10	5,03	4,75	1,05	1,24
	Média:	3,81	3,57	3,99	3,91	3,61	0,94	1,09
Desv.P:	0,19	0,40	0,76	0,76	0,77	0,09	0,12	
50kg/m ³ de FA AN	N50-1	5,16	6,57	8,04	7,63	6,72	1,27	1,16
	N50-2	5,71	7,36	7,37	6,68	5,98	1,29	0,91
	N50-3	4,51	5,00	6,19	5,88	5,26	1,11	1,18
	N50-4	4,54	3,99	4,5	4,44	4,16	0,88	1,11
	Média:	4,98	5,73	6,53	6,16	5,53	1,14	1,09
Desv.P:	0,57	1,52	1,55	1,35	1,09	0,19	0,12	
Sem fibras 20% de AR	20R0-1	3,23	0,45	0,06	*	*	0,14	**
	20R0-2	3,55	0,45	0,08	*	*	0,13	**
	20R0-3	3,43	0,44	0,06	*	*	0,13	**
	20R0-4	3,16	0,48	0,06	*	*	0,15	**
	20R0-5	3,18	0,49	0,03	*	*	0,15	**
	Média:	3,31	0,46	0,06	**	**	0,14	**
Desv.P:	0,17	0,02	0,02	**	**	0,01	**	
20kg/m ³ de FA 20% de AR	20R20-1	3,99	2,14	2,34	2,32	2,21	0,54	1,08
	20R20-2	4,79	2,31	2,61	2,58	2,37	0,48	1,12
	20R20-3	4,6	2,37	2,66	2,66	2,27	0,52	1,12
	20R20-4	4,76	2,6	2,97	2,85	2,55	0,55	1,10
	20R20-5	4,12	1,93	2,12	1,96	1,71	0,47	1,02
	Média:	4,452	2,27	2,54	2,47	2,222	0,51	1,09
Desv.P:	0,37	0,25	0,32	0,34	0,31	0,03	0,04	

35kg/m ³ de FA 20% de AR	20R35-1	5,22	5,13	6,18	6,05	5,46	0,98	1,18
	20R35-2	3,76	2,43	2,91	2,99	2,83	0,65	1,23
	20R35-3	5,03	3,89	4,59	4,6	4,13	0,77	1,18
	20R35-4	4,13	2,75	3,44	3,51	3,44	0,67	1,28
	20R35-5	4,21	3,91	4,66	4,29	3,98	0,93	1,10
	Média:	4,47	3,622	4,36	4,29	3,968	0,80	1,19
	Desv.P:	0,63	1,07	1,27	1,17	0,98	0,15	0,07
50kg/m ³ de FA 20% de AR	20R50-1	4,53	6,25	6,87	5,65	4,89	1,38	0,90
	20R50-2	3,88	4,34	5,32	5,38	4,99	1,12	1,24
	20R50-3	4,19	4,95	5,47	5,15	4,61	1,18	1,04
	20R50-4	3,77	4,65	5,42	5,09	4,6	1,23	1,09
	20R50-5	4,34	6,34	7,46	6,23	5,92	1,46	0,98
	Média:	4,142	5,306	6,11	5,50	5,002	1,27	1,05
	Desv.P:	0,32	0,93	0,99	0,46	0,54	0,14	0,13
Sem fibras 50% de AR	50R0-1	3,21	0,44	0,02	*	*	0,14	**
	50R0-2	2,98	0,28	*	*	*	0,09	**
	50R0-3	3,21	0,35	*	*	*	0,11	**
	50R0-4	2,98	0,55	0,04	*	*	0,18	**
	50R0-5	2,97	0,58	0,09	*	*	0,20	**
	Média:	3,07	0,44	0,05	**	**	0,14	**
	Desv.P:	0,13	0,13	0,04	**	**	0,04	**
20kg/m ³ de FA 50% de AR	50R20-1	3,47	2,51	2,66	2,57	2,4	0,72	1,02
	50R20-2	4,56	2,01	2,15	2,1	2	0,44	1,04
	50R20-3	3,44	2,05	2,1	2,04	1,85	0,60	1,00
	50R20-4	3,43	2,02	2,43	2,43	2,19	0,59	1,20
	50R20-5	3,91	2,71	2,92	2,9	2,58	0,69	1,07
	Média:	3,762	2,26	2,45	2,41	2,204	0,61	1,07
	Desv.P:	0,49	0,33	0,35	0,35	0,29	0,11	0,08
35kg/m ³ de FA 50% de AR	50R35-1	3,94	4,23	5,04	4,97	4,71	1,07	1,17
	50R35-2	4,18	3,33	3,56	3,44	3,14	0,80	1,03
	50R35-3	3,05	3,28	3,83	3,86	3,57	1,08	1,18
	50R35-4	3,95	3,87	4,17	3,92	3,51	0,98	1,01
	50R35-5	4,11	4,19	4,49	4,28	3,84	1,02	1,02
	Média:	3,846	3,78	4,22	4,09	3,754	0,99	1,08
	Desv.P:	0,46	0,46	0,58	0,57	0,59	0,11	0,08
50kg/m ³ De FA 50% de AR	50R50-1	5,05	5,41	6,08	5,76	5,13	1,07	1,06
	50R50-2	4,42	7,31	7,78	7,34	6,54	1,65	1,00
	50R50-3	4,77	5,60	6,3	6,05	5,43	1,17	1,08
	50R50-4	4,61	5,61	6,6	6,33	5,8	1,22	1,13
	50R50-5	4,26	3,73	4,17	3,84	3,47	0,88	1,03
	Média:	4,622	5,532	6,19	5,86	5,274	1,20	1,06
	Desv.P:	0,31	1,27	1,30	1,28	1,14	0,29	0,05

*Valor não obtido

** Cálculo prejudicado