

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE
MICROCONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO MISTO REFORÇADOS
COM FIBRAS DE AÇO**

Alegrete

2025

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE
MICROCONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO MISTO REFORÇADOS
COM FIBRAS DE AÇO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. D.Sc. Ederli Marangon

Alegrete

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M499a Meichtry, Rubens Silveira

Análise das propriedades nos estados fresco e endurecido de
microconcretos com agregado reciclado misto reforçados com
fibras de aço / Rubens Silveira Meichtry.

112 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.

"Orientação: Ederli Marangon".

1. Agregado miúdo reciclado. 2. Desempenho do
microconcreto. 3. Economia circular. 4. Resíduo da construção
civil. 5. Sustentabilidade ambiental. I. Título.

RUBENS SILVEIRA MEICHTRY

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES NOS ESTADOS FRESCO E ENDURECIDO DE
MICROCONCRETOS
COM AGREGADO RECICLADO MISTO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 14/08/2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
(Unipampa)

Profa Dra Simone Dornelles Venquiaruto
(Unipampa)

Prof. Dr. Sidiclei Formagini
(UFMS)

Prof. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo
(USJT)



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2025, às 10:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2025, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Dimas Alan Strauss Rambo, Usuário Externo**, em 15/08/2025, às 14:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Sidiclei Formagini, Usuário Externo**, em 18/08/2025, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1780759** e o código CRC **E9D71CAE**.

Dedico este trabalho aos meus amados pais,
Mari e José Bruno, por todo o incentivo e
apoio.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde, proteção e por nunca me deixar sozinho. Em tantos momentos desafiadores, sua presença me deu força e coragem para continuar.

Desejo que meu avô, Rubens Da Silveira (*in memoriam*), sinta orgulho do homem e profissional que venho me tornando. Levo comigo sua memória, seu exemplo e sua presença em cada conquista.

À minha família, meu porto seguro. Aos meus amados pais, José Bruno e Mari, e aos meus queridos irmãos, Brunári e Bruno Cesar, minha mais profunda gratidão. Obrigado por cada palavra de apoio, cada conselho dado com amor, e por sempre acreditarem no meu potencial. Este sonho também é de vocês, pois, sem o amor, a força e a presença de vocês, nada disso teria sido possível.

Aos meus familiares, em especial ao meu tio Carlos, que me deu minha primeira oportunidade profissional na área da construção civil e despertou em mim o desejo de cursar Engenharia Civil, um gesto que mudou o rumo da minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Ederli Marangon, pelas oportunidades ao longo desses anos, e acima de tudo, pela amizade construída desde a iniciação científica até aqui. Seus ensinamentos e seu exemplo de dedicação à pesquisa são inspiradores.

Aos professores D.Sc. Dimas Alan Rambo, D.Sc. Sidiclei Formagini e D.Sc. Simone Venquiaruto, agradeço por aceitarem compor a banca examinadora e por contribuírem com seu tempo e conhecimento na avaliação deste trabalho.

Aos técnicos Raquel Machado e Felipe Sobral, e ao engenheiro Marcelo de Oliveira, por todo auxílio e suporte prestados na utilização dos laboratórios.

Aos colegas do grupo de pesquisa MAEC, pelos momentos compartilhados ao longo desta jornada. Foram dias intensos, de muito trabalho, que se tornaram mais leves e divertidos graças à parceria e à amizade de cada um de vocês.

Às empresas parceiras, SBR Reciclagem, Postes Indaial, Pozo Fly, Grupo Pilecco Nobre e MC-Bauchemie Brasil, pelas doações do agregado reciclado, cimento, cinza volante, sílica da casca de arroz e aditivo químico, respectivamente.

Ao Hospital de Guarnição de Alegrete (HGuA), em especial ao 3º Sargento Marco Aurélio Terme, pela realização dos exames radiográficos nas placas.

À CAPES, pelo apoio financeiro que permitiu minha dedicação integral ao mestrado.

Por fim, a todos que cruzaram meu caminho nestes sete anos na UNIPAMPA, campus Alegrete-RS, meu mais sincero obrigado. Permanece em mim a certeza de que ninguém chega

a lugar nenhum sozinho, e eu tive a sorte de estar cercado por pessoas incríveis ao longo de toda essa trajetória.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades reológicas no estado fresco e as propriedades mecânicas no estado endurecido de microconcretos, produzidos com a substituição total do agregado miúdo natural por agregado reciclado de RCC, bem como analisar a influência da incorporação de fibras de aço. Para a produção dos microconcretos, foram utilizados cimento Portland (CP) V-ARI, cinza volante, sílica da casca de arroz (SCA), agregados miúdos natural de rio e reciclado de RCC (com diâmetro máximo de 600 μm), aditivo superplastificante, fibras de aço com comprimentos de 12 mm e 25 mm, e água (relação água/cimento de 0,16). A caracterização no estado fresco foi realizada por meio dos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento t_{500} no cone de Abrams, habilidade passante no anel J e na caixa L, além da fluidez e da viscosidade no Funil V. No estado endurecido, foram determinadas a resistência à compressão axial, em cubos de 100 x 100 x 100 mm, e a resistência à tração na flexão a quatro pontos, em placas de 400 x 100 x 12 mm, após 28 e 90 dias de cura úmida. Além disso, imagens radiográficas das placas foram utilizadas para analisar a distribuição das fibras de aço nos compósitos cimentícios. Os microconcretos produzidos apresentaram propriedades reológicas no estado fresco compatíveis com os critérios estabelecidos pelas normas técnicas e especificações para concretos autoadensáveis. No estado endurecido, os microconcretos contendo agregado reciclado de RCC sem e com reforços fibrosos demonstraram alto desempenho mecânico, com resistência à compressão axial variando entre 76,82 MPa e 116,09 MPa, e a resistência à tração na flexão a quatro pontos variando entre 4,48 MPa e 11,63 MPa. A incorporação de fibras de aço nos microconcretos com agregado reciclado resultou em diferenças significativas, principalmente nos ensaios à tração na flexão, evidenciando a influência das fibras no comportamento pós pico e no aumento da tenacidade dos compósitos. As imagens radiográficas permitiram avaliar a eficiência da distribuição das fibras na matriz cimentícia, possibilitando uma análise qualitativa da orientação e dispersão das fibras e sua correlação com o desempenho mecânico observado nos ensaios de flexão a quatro pontos.

Palavras-Chave: Agregado miúdo reciclado; Desempenho do microconcreto; Economia circular; Resíduo da construção civil; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the rheological properties in the fresh state and the mechanical properties in the hardened state of microconcretes produced with the total replacement of natural fine aggregate by recycled construction and demolition waste (CDW) aggregate, as well as to analyze the influence of incorporating steel fibers. For the production of the microconcretes, Portland cement (CP V-ARI), fly ash, rice husk ash (RHA), natural river sand and recycled CDW fine aggregates (with a maximum diameter of 600 μm), superplasticizer admixture, steel fibers with lengths of 12 mm and 25 mm, and water (water/cement ratio of 0.16) were used. The characterization in the fresh state was performed through slump flow and t500 flow time tests using the Abrams cone, passing ability using the J-ring and L-box, as well as flowability and viscosity using the V-funnel. In the hardened state, the axial compressive strength was determined on 100 x 100 x 100 mm cubes, and the four-point flexural tensile strength on 400 x 100 x 12 mm plates, after 28 and 90 days of moist curing. In addition, radiographic images of the plates were used to analyze the distribution of steel fibers within the cementitious composites. The produced microconcretes exhibited rheological properties in the fresh state compatible with the criteria established by technical standards and specifications for self-compacting concretes. In the hardened state, microconcretes containing recycled CDW aggregate with and without fiber reinforcement demonstrated high mechanical performance, with axial compressive strength ranging from 76.82 MPa to 116.09 MPa, and four-point flexural tensile strength ranging from 4.48 MPa to 11.63 MPa. The incorporation of steel fibers into the microconcretes with recycled aggregate resulted in significant differences, especially in the flexural tensile tests, highlighting the influence of the fibers on post-peak behavior and the increased toughness of the composites. The radiographic images allowed for the evaluation of the efficiency of fiber distribution within the cementitious matrix, enabling a qualitative analysis of fiber orientation and dispersion and their correlation with the mechanical performance observed in the four-point flexural tests.

Keywords: Recycled fine aggregate; Microconcrete performance; Circular economy; Construction and demolition waste; Environmental sustainability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Agregados: a) natural de rio e b) reciclado de RCC | 32 |
| Figura 2 – Curvas granulométricas dos agregados natural e reciclado, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022)..... | 33 |
| Figura 3 – Grãos do agregado reciclado classificados por grupo, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021)..... | 34 |
| Figura 4 – Agitador de peneiras mecânico | 35 |
| Figura 5 – Agregados miúdos separados por faixa granulométrica, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022): a) AN150, b) AN425, c) AR150 e d) AR425 | 35 |
| Figura 6 – Imagens obtidas por MEV (100x) dos agregados com dimensões entre 425 µm e 600 µm: a) natural e b) reciclado..... | 36 |
| Figura 7 – Procedimentos realizados: a) composição granulométrica e b) densidades e absorção de água, conforme as normas NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 16916 (ABNT, 2021)..... | 39 |
| Figura 8 – Materiais cimentícios: a) CP V-ARI, b) cinza volante e c) SCA..... | 40 |
| Figura 9 – Resultados de resistência à compressão do CP V-ARI, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019)..... | 40 |
| Figura 10 – Curvas granulométricas dos materiais cimentícios obtidas por granulometria a laser..... | 42 |
| Figura 11 – Caracterização mineralógica dos materiais cimentícios determinada por DRX: a) CP V-ARI, b) cinza volante e c) SCA | 43 |
| Figura 12 – Procedimentos realizados: a) resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e b) massa específica, de acordo com as normas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 16605 (ABNT, 2017)..... | 45 |
| Figura 13 – Superplastificante MC-PowerFlow 4001 | 46 |
| Figura 14 – Etapas do procedimento de caracterização do aditivo químico: a) teor de sólidos e b) massa específica, conforme a norma NBR 11768-3 (ABNT, 2019)..... | 46 |
| Figura 15 – Fibras metálicas: a) microfibras Astra 24/12, b) macrofibras Astra 50/25 e c) formato das fibras | 48 |
| Figura 16 – Fluxograma do programa experimental | 49 |
| Figura 17 – Misturador turbilhonador MT120 | 52 |
| Figura 18 – Etapas do processo de mistura do microconcreto MRF2: a) homogeneização dos materiais secos, b) microconcreto após 10 minutos de mistura c) microconcreto após 25 | |

| | |
|--|----|
| minutos de mistura e d) incorporação das macrofibras ASTRA 50/25 e) fim do processo de mistura..... | 52 |
| Figura 19 – Configuração do ensaio do tronco de cone de Abrams, de acordo com a NBR15823-2 (ABNT, 2017)..... | 54 |
| Figura 20 – Configuração do ensaio do anel J, conforme a NBR 15823-3 (ABNT, 2017)..... | 55 |
| Figura 21 – Configuração do ensaio da Caixa L, segundo a norma NBR 15823-4 (ABNT, 2017)..... | 56 |
| Figura 22 – Configuração do ensaio do Funil V, normatizado pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017)..... | 57 |
| Figura 23 – Moldes metálicos: a) cúbico de 100 x 100 x 100 mm e b) prismático de 400 x 100 x 100 mm..... | 58 |
| Figura 24 – Corpos de prova: a) protegidos por uma manta umedecida e b) mantidos em cura úmida em ambiente controlado, de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006)..... | 58 |
| Figura 25 – Etapas dos exames radiográficos: a) mesa de radiografia, b) painel de controle com os parâmetros de exposição utilizados (52 kVp, 200 mA e 16 mAs), c) realização do exame nas placas e d) tratamento da imagem radiográfica..... | 60 |
| Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à compressão axial: a) máquina de ensaios universais Instron e b) realização do ensaio no cubo..... | 61 |
| Figura 27 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos: a) máquina de ensaios universais EMIC, b) vista frontal do ensaio e c) vista posterior do ensaio..... | 63 |
| Figura 28 – Imagens obtidas durante a realização dos ensaios reológicos no microconcreto MRF2: a) e b) tronco de cone de Abrams, c) e d) anel J, e) caixa L e f) funil V, conforme as normas NBR 15823-2, NBR 15823-3, NBR 15823-4 e NBR 15823-5 (ABNT, 2017)..... | 68 |
| Figura 29 – Curvas de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 28 dias: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12..... | 69 |
| Figura 30 – Comportamentos de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 90 dias: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12..... | 71 |
| Figura 31 – Curvas típicas de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos: a) aos 28 dias e b) aos 90 dias..... | 73 |
| Figura 32 – Modos de ruptura típicos dos cubos após o ensaio de compressão axial: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12..... | 77 |
| Figura 33 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 28 dias: a) MN e b) MR..... | 78 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – Modos de ruptura das placas dos microconcretos aos 28 dias: a) MN e b) MR ... | 79 |
| Figura 35 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF1 aos 28 dias | 80 |
| Figura 36 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF1 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03 | 80 |
| Figura 37 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF2 aos 28 dias | 83 |
| Figura 38 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF2 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02, c) CP03 e d) CP04 | 83 |
| Figura 39 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF12 aos 28 dias | 86 |
| Figura 40 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF12 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03 | 86 |
| Figura 41 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 90 dias: a) MN e b) MR | 88 |
| Figura 42 – Modos de ruptura das placas dos microconcretos aos 90 dias: a) MN e b) MR ... | 89 |
| Figura 43 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF1 aos 90 dias | 90 |
| Figura 44 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF1 aos 90 dias: a) CP01 e b) CP02 | 90 |
| Figura 45 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF2 aos 90 dias | 92 |
| Figura 46 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF2 aos 90 dias: a) CP01, b) CP02, c) CP03 e d) CP04 | 93 |
| Figura 47 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF12 aos 90 dias | 95 |
| Figura 48 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF12 aos 90 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03 | 96 |
| Figura 49 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos: a) aos 28 dias e b) aos 90 dias | 98 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Porcentagens em massa dos grupos de fragmentos identificados no agregado reciclado, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021)..... | 34 |
| Tabela 2 – Resultados das densidades e absorção de água dos agregados, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021)..... | 37 |
| Tabela 3 – Composição química das faixas granulométricas do agregado reciclado determinada por FRX | 38 |
| Tabela 4 – Composição química dos materiais cimentícios determinada por FRX..... | 41 |
| Tabela 5 – Massa específica dos materiais cimentícios obtida pelo método do frasco de Le Chatelier, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017)..... | 42 |
| Tabela 6 – Propriedades do superplastificante, segundo a norma NBR 11768-3 (ABNT, 2019) | 46 |
| Tabela 7 – Características das fibras de aço, de acordo com a fabricante..... | 48 |
| Tabela 8 – Composição em kg/m ³ e índice de reforço dos microconcretos | 51 |
| Tabela 9 – Data de produção dos microconcretos, temperatura, umidade relativa, densidade, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005) e massa de cada placa | 59 |
| Tabela 10 – Quantidade de amostras para cada um dos ensaios mecânicos aos 28 e 90 dias de idade | 59 |
| Tabela 11 – Resultados das propriedades reológicas no estado fresco dos microconcretos, conforme as normas NBR 15823-2, NBR 15823-3, NBR 15823-4 e NBR 15823-5 (ABNT, 2017)..... | 64 |
| Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão axial e deslocamento máximos (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos microconcretos aos 28 e 90 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018)..... | 73 |
| Tabela 13 – Resultados de resistência à tração na flexão a quatro pontos e deslocamento máximos (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos microconcretos aos 28 e 90 dias, conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010)..... | 100 |
| Tabela 14 – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), referentes ao ensaio de resistência à compressão axial dos microconcretos..... | 111 |
| Tabela 15 – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos | 112 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

Abs – Absorção de água

AN – Agregado natural

AR – Agregado reciclado

ARCI – Agregado reciclado cimentício

ARCO – Agregado reciclado de concreto

ARM – Agregados reciclados misto

CEN – European Committee for Standardization

CDI – Correlação Digital de Imagens

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Cimento Portland

CPs – Corpos de prova

CRF – Concreto Reforçado com Fibras de aço

DRX – Difração de Raios-X

FRX – Fluorescência de Raios-X

GOMNDI – Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos

HGuA – Hospital de Guarnição de Alegrete

kVp – Quilovoltagem de pico

l/d – Relação de aspecto

LABNANO – Laboratório de Nanobiotecnologia

LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

MAEC – Grupo de Modelagem e Análise Experimental de Compósitos

mA – Miliampères

mAs – Miliampères-segundos

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

RCCs – Resíduos de construção e demolição

SCA – Sílica da casca de arroz

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

ρ_s – Densidade do agregado na condição seca

ρ_{sss} – Densidade do agregado na condição saturada superfície seca

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Objetivos..... | 22 |
| 1.1.1 | Objetivo geral..... | 22 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 22 |
| 2 | CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA..... | 23 |
| 2.1 | Microconcreto de alto desempenho..... | 23 |
| 2.2 | Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCCs) | 24 |
| 2.3 | Propriedades reológicas no estado fresco de concretos contendo agregados reciclados..... | 25 |
| 2.4 | Propriedades mecânicas no estado endurecido de concretos contendo agregados reciclados..... | 26 |
| 2.5 | Fibras de aço | 28 |
| 2.6 | Concreto Reforçado com Fibras de aço (CRFA)..... | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS | 32 |
| 3.1 | Materiais..... | 32 |
| 3.1.1 | Agregados | 32 |
| 3.1.2 | Materiais cimentícios..... | 39 |
| 3.1.3 | Aditivo químico..... | 45 |
| 3.1.4 | Fibras de aço | 47 |
| 3.1.5 | Água | 48 |
| 3.2 | Métodos experimentais | 48 |
| 3.2.1 | Definição da composição dos microconcretos | 49 |
| 3.2.2 | Produção dos microconcretos..... | 51 |
| 3.2.3 | Avaliação das propriedades reológicas no estado fresco | 53 |
| 3.2.4 | Moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova | 57 |
| 3.2.5 | Imagens radiográficas | 59 |
| 3.2.6 | Avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido | 60 |
| 4 | RESULTADOS | 64 |
| 4.1 | Avaliação das propriedades reológicas no estado fresco | 64 |
| 4.2 | Avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido | 69 |
| 4.2.1 | Comportamento à compressão axial dos microconcretos..... | 69 |
| 4.2.2 | Comportamento à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos..... | 78 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 102 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 104 |
| | REFERÊNCIAS | 105 |
| | ANEXOS | 111 |

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico de um país. No entanto, também se destaca como uma das principais atividades que mais impactam negativamente o meio ambiente, devido à elevada extração de recursos naturais, ao intenso consumo energético, à significativa emissão de gases de efeito estufa e à expressiva geração de resíduos sólidos.

O elevado volume de resíduos da construção civil (RCCs) gerados está associado a fatores como ao crescimento acelerado dos centros urbanos, a informalidade do setor e a execução de atividades de construção, reforma, reparo e demolição. Além disso, a falta de fiscalização, o descumprimento e as falhas dos planos diretores e das políticas públicas, assim como os baixos incentivos econômicos, dificultam a implementação de práticas sustentáveis, como a reciclagem e o reaproveitamento desses materiais. Eventos extremos, como desastres naturais, também intensificam a geração de RCCs, agravando os desafios da gestão pública e ambiental.

De acordo com a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), os RCCs são constituídos por materiais como tijolos, blocos cerâmicos, concretos, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas, popularmente conhecidos como entulhos de obras, calça ou metralha. Em 2023, estima-se que o Brasil tenha gerado aproximadamente 44 milhões de toneladas de RCCs, correspondendo a 208,40 kg de entulho por habitante, com taxas de reciclagem não ultrapassando os 15% (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024). O restante, estima-se que foi depositado de maneira irregular, em terrenos baldios, margens de rios e córregos, áreas periféricas e de preservação ambiental, vias públicas e áreas urbanas desocupadas, contribuindo para a degradação do solo, contaminação da água e do ar, e impactando negativamente a saúde pública.

Nesse contexto, a economia circular surge como uma abordagem estratégica para a construção civil, possibilitando a redução, reutilização e reciclagem de materiais, transformando resíduos em novos insumos e diminuindo a exploração de recursos naturais. Essa perspectiva está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), com destaque para o ODS 11, que visa tornar as cidades e comunidades mais sustentáveis e o ODS 12, que busca assegurar padrões responsáveis de produção e consumo (Ossio *et al.*, 2023).

Para viabilizar esse apelo sustentável, torna-se essencial investimentos de recursos em pesquisas acadêmicas e inovação tecnológica, possibilitando o desenvolvimento de soluções viáveis para o reaproveitamento dos RCCs. Dentre as alternativas, destaca-se a utilização de agregados reciclados na produção de concretos e argamassas, que possibilita a substituição parcial ou total dos agregados naturais. Esta prática não apenas reduz o consumo excessivo de recursos naturais não renováveis e a demanda por aterros sanitários, mas também favorece a economia de energia e as reduções dos custos de transportes e das emissões de dióxido de carbono (CO₂).

No entanto, no que tange os agregados reciclados, estes apresentam características distintas dos naturais, principalmente em relação à porosidade, área superficial, absorção de água e resistência mecânica. Enquanto os agregados naturais são extraídos de fontes geológicas e possuem propriedades predominantemente homogêneas, os reciclados são obtidos a partir do beneficiamento de RCCs e podem conter fragmentos de pasta de concreto endurecida, rochas, materiais cerâmicos e, em menor proporção, materiais indesejáveis. Devido a essa composição, o beneficiamento desses resíduos exige processos rigorosos, que se inicia na separação correta dos resíduos, britagem controlada e classificação granulométrica, para garantir agregados reciclados adequados à produção de concretos e argamassas.

Diversos estudos têm avaliado o desempenho mecânico de concretos convencionais contendo agregados reciclados (Singh & Singh; 2018; Akono *et al.*, 2021; Passos *et al.*, 2020; El-Seidy *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023). Entretanto, o estudo de agregados miúdos reciclados provenientes de RCCs, em concretos especiais ainda mais com a substituição total do agregado natural de rio é um campo pouco explorado. Entre os concretos de alto desempenho, destaca-se o microconcreto, caracterizado pela utilização de materiais com dimensão máxima reduzida ($\leq 4,8$ mm) e uma baixa relação água/cimento ($< 0,25$) (Da Silva *et al.*, 2019).

Além disso, são necessários estudos das propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas no estado endurecido de microconcretos reforçados com fibras de aço quando combinadas com agregados reciclados. As fibras de aço são amplamente utilizadas para melhorar a ductilidade, tenacidade e resistência pós-fissuração do concreto, podendo compensar eventuais perdas de desempenho mecânico e de durabilidade associadas à substituição dos agregados naturais.

Diante desse contexto, essa área carece de estudos que avaliem as propriedades dos microconcretos com agregado reciclado de RCC reforçados com fibras de aço nos estados fresco e endurecido. A avaliação dessas propriedades é fundamental para a viabilidade da

utilização do agregado reciclado, e também no desenvolvimento de materiais cimentícios inovadores e sustentáveis, com desempenho adequado às exigências da construção civil moderna.

1.1 Objetivos

Os objetivos estão classificados em geral e específicos e são apresentados nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral é avaliar as propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas no estado endurecido de microconcretos produzidos com agregado natural de rio, com substituição total do agregado natural por agregado reciclado de RCC sem e com reforços fibrosos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir microconcretos com agregado reciclado de RCC, sem fibras (controle) e com microfibras, macrofibras e reforço híbrido, em teor volumétrico de 2%;
- Avaliar as propriedades reológicas no estado fresco dos microconcretos, por meio dos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento do tronco de cone de Abrams, da habilidade passante no anel J e na caixa L, bem como da fluidez no funil V;
- Avaliar as propriedades mecânicas no estado endurecido dos microconcretos, através dos ensaios mecânicos de compressão axial e de tração na flexão a quatro pontos, nas idades de 28 e 90 dias;
- Comparar os resultados das propriedades reológicas e mecânicas dos microconcretos;
- Analisar qualitativamente a distribuição das fibras de aço das placas através de imagens radiográficas.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, são abordados os fundamentos teóricos sobre o microconcreto de alto desempenho e os resíduos da construção civil, com ênfase na sua classificação, reciclagem e aplicação como agregado reciclado na produção de concretos. Além disso, são discutidas as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos com agregados reciclados, bem como a influência das fibras de aço nas propriedades dos materiais cimentícios.

2.1 Microconcreto de alto desempenho

O microconcreto abrange diversas misturas cimentícias, como grautes, argamassas estruturais (autoadensáveis e tixotrópicas), além de argamassas armadas. Quando classificado como microconcreto de alto desempenho, seu controle de qualidade torna-se um aspecto fundamental, exigindo rigor na verificação da granulometria, do formato e do teor de umidade dos agregados, antes mesmo da dosagem dos constituintes. Sua composição inclui cimento, agregado miúdo e água, podendo conter aditivos e adições minerais para aprimorar as propriedades nos estados fresco e endurecido (Aitcin, 2000; Poggiali, 2010).

O microconcreto de alto desempenho, destaca-se por atender às exigências de sistemas e componentes construtivos mais leves, agregando valor tecnológico a elementos estruturais robustos. Sua aplicação contribui para a diversificação dos produtos disponíveis nos mercados habitacional, industrial e comercial, representando um diferencial competitivo para a indústria da construção civil (Campos, 2002).

A adequação granulométrica e a dosagem correta dos materiais conferem ao microconcreto propriedades superiores às do concreto convencional, incluindo trabalhabilidade, resistência à compressão e à tração e durabilidade sob ambientes agressivos. A ausência de agregados graúdos pode impactar o custo-benefício em algumas situações, mas se justifica em aplicações que demandam elevada fluidez e homogeneidade. A utilização de agregados de menor dimensão influencia a zona de transição pasta-agregado, a qual apresenta maior densidade e menor índice de vazios no microconcreto, favorecendo, assim, a resistência mecânica e a durabilidade do material.

Devido a essas características, o microconcreto é utilizado em diversas aplicações estruturais de pequeno porte, como reservatórios, painéis de divisão e peitoris. Além disso, são empregados na produção de concretos moldados *in loco*, em peças pré-moldadas e na recuperação e reforço de elementos estruturais (Da Silva *et al.*, 2019).

2.2 Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCCs)

Os RCCs são classificados em quatro classes, conforme a Resolução n° 307 do CONAMA (2002), com o objetivo de garantir seu correto gerenciamento e destinação. A classe A compreende resíduos passíveis de reutilização ou reciclagem como agregados, incluindo concreto, argamassa, cerâmica e tijolos, que podem ser reaproveitados em novas aplicações na construção civil. A classe B abrange materiais recicláveis para outras indústrias, como plásticos, metais, vidros, papel e madeira, permitindo sua reinserção em cadeias produtivas distintas. A classe C refere-se a resíduos cuja reciclagem ainda não dispõe de tecnologia economicamente viável, como certos tipos de gesso e materiais compostos, representando um desafio para o setor. Por fim, a classe D engloba resíduos perigosos ou contaminantes, como tintas, solventes, óleos e materiais contendo amianto, exigindo tratamento e disposição final adequados para minimizar riscos ambientais e à saúde pública. Essa classificação promove a gestão sustentável dos RCCs, incentivando práticas de reciclagem e a redução do impacto ambiental da construção civil, alinhando-se aos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n° 12.305/2010).

Apesar da capacidade de reciclagem estimada em 98% dos RCCs no Brasil, estudos indicam que apenas 21% desses resíduos são efetivamente reciclados. Esse cenário está relacionado, sobretudo, à dificuldade de fiscalização dos pequenos geradores, uma vez que as grandes construtoras estão sujeitas a normas mais rigorosas e buscam certificações ambientais. Após o beneficiamento, os RCCs são frequentemente utilizados como matéria-prima para bases e sub-bases de pavimentos e como agregados para concretos e argamassas, sendo processados em usinas de reciclagem específicas (John & Cincotto, 2003).

Os agregados reciclados de RCC podem ser classificados em dois grupos principais: Agregados Reciclados de Concreto (ARCO), obtidos da britagem de concreto residual, e Agregados Reciclados Misto (ARM), compostos por resíduos cerâmicos e concretos. De acordo com Ferreira *et al.* (2019), a produção de ARM é significativamente superior à de ARCO, porém os ARM apresentam impactos mais negativos nas propriedades mecânicas do concreto, quando comparados aos ARCO.

O principal desafio associado à utilização de ARM está relacionado à sua elevada absorção de água, que ainda é maior do que a observada nos ARCO. Esse comportamento resulta da presença de pasta de cimento aderida à superfície dos agregados, aumentando a porosidade e reduzindo a densidade desses materiais (Sosa *et al.*, 2023). Além disso, a relação água/cimento (a/c) torna-se mais difícil de ser controlada, uma vez que os ARM absorvem

mais água. Caso os agregados não sejam pré-saturados adequadamente antes da mistura, pode ocorrer um aumento indesejado da relação a/c efetiva, comprometendo a resistência mecânica e a durabilidade do concreto.

2.3 Propriedades reológicas no estado fresco de concretos contendo agregados reciclados

Os concretos devem apresentar boa trabalhabilidade, especialmente em aplicações que envolvem espaços reduzidos, como em fôrmas ou entre as armaduras. No entanto, em compósitos cimentícios contendo agregados reciclados, observa-se que a incorporação crescente desse tipo de agregado demanda uma maior quantidade de água para alcançar a mesma consistência. Esse comportamento pode estar associado à presença de partículas finas ($< 75 \mu\text{m}$), que aumentam a superfície específica a ser molhada, bem como à maior porosidade do agregado reciclado (Silva Neto & Leite, 2018; Oliveira & Cabral, 2011).

Além disso, Bravo *et al.* (2017) e García-González *et al.* (2014, 2017) destacam que a alta absorção de água dos agregados reciclados contribui para o aumento da aspereza da mistura e da fricção entre as partículas do agregado, resultando em menor fluidez do concreto. Essa aspereza também está relacionada à forma irregular e à textura rugosa das partículas, características que dificultam a dispersão dos grãos e a mobilidade da pasta cimentícia. Consequentemente, concretos contendo agregados reciclados tendem a apresentar uma trabalhabilidade reduzida, especialmente na ausência de aditivos redutores de água (Pereira *et al.*, 2012).

A redução da trabalhabilidade decorrente do maior teor de agregados reciclados pode ser corrigida pela incorporação de uma quantidade adicional de água na mistura ou pela pré-molhagem dos agregados antes da mistura (García-González *et al.*, 2014, 2017). Alguns estudos adotam como critério a adição de um volume de água equivalente à quantidade que seria absorvida pelos agregados reciclados se fossem submersos por dez minutos (Alves *et al.*, 2014; Barbudo *et al.*, 2013). A pré umidificação do agregado reciclado demonstrou ser eficaz para melhorar a consistência da mistura, especialmente quando o nível de saturação do agregado era controlado (García-González *et al.*, 2014).

No entanto, em alguns casos, mesmo a incorporação de água adicional não é suficiente para compensar a perda de fluidez devido à elevada rugosidade das partículas recicladas (García-González *et al.*, 2017). Sendo assim, o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes surge como uma alternativa eficiente para restaurar a trabalhabilidade dos

compósitos cimentícios contendo agregados reciclados. Além de melhorar a fluidez da mistura, esses aditivos reduzem o volume de vazios no concreto, proporcionando melhorias no desempenho mecânico (Barbudo *et al.*, 2013). Esse efeito é particularmente relevante quando se utilizam agregados reciclados, pois reduz a necessidade de adição excessiva de água, evitando impactos negativos na resistência e na durabilidade do concreto.

A relação a/c desempenha um papel fundamental na qualidade dos concretos, pois valores mais baixos resultam em maior resistência mecânica e durabilidade. Entretanto, uma redução excessiva da relação a/c pode comprometer a moldagem, tornando o material menos fluido e dificultando seu adensamento, o que pode ser contornado pelo uso de aditivos redutores de água (Matias *et al.*, 2014; Barbudo *et al.*, 2013). Contudo, Pereira *et al.* (2012) e Bravo *et al.* (2017) alertam que a eficiência dos superplastificantes tende a diminuir à medida que se aumenta o teor de substituição do agregado miúdo natural de rio pelo agregado miúdo reciclado de RCC. Essa perda de eficiência exige um aumento da relação a/c para compensar a água absorvida pelo agregado reciclado e alcançar a trabalhabilidade desejada, resultando em menor resistência do concreto e maior porosidade, o que pode comprometer sua durabilidade a longo prazo.

2.4 Propriedades mecânicas no estado endurecido de concretos contendo agregados reciclados

A substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados pode impactar negativamente o comportamento mecânico do concreto, exigindo ajustes na dosagem para minimizar os impactos estruturais. No geral, o aumento do teor de agregados reciclados na mistura está associado à redução da resistência à compressão, conforme apontado por diversos estudos (Barbudo *et al.*, 2013; García-González *et al.*, 2017; Matias *et al.*, 2014; Pereira, *et al.*, 2012). Segundo Barbudo *et al.* (2013), esse comportamento é influenciado pela presença de pasta de cimento aderida à superfície dos agregados reciclados, o que resulta em maior absorção de água e menor densidade das partículas. Além disso, a maior porosidade dos agregados reciclados reduz sua resistência individual, impactando negativamente a resistência do concreto (Alves *et al.*, 2014).

Bravo *et al.* (2017) destacam ainda a necessidade de aumentar a relação a/c para restaurar a trabalhabilidade pode contribuir para a perda da resistência mecânica do concreto reciclado. Embora a pré molhagem ou saturação do agregado reciclado seja uma estratégia frequentemente utilizada para minimizar a absorção de água dos agregados durante a mistura,

estudos indicam que esse procedimento pode comprometer as propriedades mecânicas. García-González *et al.* (2014) observaram que concretos produzidos com substituições de 0, 20, 50 e 100% de agregados naturais por reciclados mistos, saturados ou saturados em condição de superfície seca, apresentaram menores valores de resistência à compressão, devido ao excesso de água disponível na mistura. A redução variou de 11%, para o período de 3 minutos de imersão a 13% para o intervalo de 5 minutos de pré-saturação. No entanto, apesar da perda de resistência, a resistência média à compressão desejada foi atingida em todas as amostras testadas.

Por outro lado, alguns estudos indicam que certos tipos de resíduos reciclados podem favorecer o desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo. No estudo desenvolvido por Etxeberria & Vegas (2015), onde foram utilizados resíduos de tijolos cerâmicos como agregado miúdo, verificou-se que, aos 7 dias de cura, a resistência à compressão foi semelhante à do concreto de referência. No entanto, após 28 dias, os concretos contendo 35% de agregado cerâmico reciclado apresentaram resistência superior à do concreto de referência. Esse comportamento foi atribuído ao efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos, que contribui para o ganho progressivo de resistência. Alves *et al.* (2014), por sua vez, ao trabalharem com agregados reciclados de tijolos cerâmicos, identificaram um efeito contrário, com redução da resistência à compressão à medida que o teor desse agregado aumentava. Os autores justificaram essa diferença pelo aumento da relação a/c, que enfraqueceu a pasta cimentícia devido à elevada porosidade do agregado reciclado.

Etxeberria & Vegas (2015) também verificaram que, para concretos com mais de 20% de substituição por resíduo cerâmico, o ganho de resistência entre 28 dias e um ano foram superiores ao do concreto de referência. Colangelo & Cioffi (2017) complementaram que essa melhoria pode estar relacionada à capacidade de absorção de água dos agregados de origem cerâmica, que reduz o excesso de água na mistura e contribui para a hidratação da matriz cimentícia. O efeito da utilização de aditivos químicos no desempenho mecânico do concreto com agregados reciclados também tem sido amplamente estudado. Barbudo *et al.* (2013), ao avaliarem concretos contendo agregado graúdo reciclado, observaram que a resistência à compressão aumentou quando foram utilizados plastificantes e superplastificantes para redução da água da mistura. Resultados semelhantes foram obtidos por García-González *et al.* (2017) e Pereira *et al.* (2012), que verificaram ganhos de resistência em concretos com substituição de agregado reciclado, tanto graúdo quanto miúdo. Dessa forma, os aditivos superplastificantes desempenham um papel fundamental no aumento da compacidade da

mistura, reduzindo os efeitos negativos da incorporação de agregados reciclados na resistência à compressão (Matias *et al.*, 2014).

A influência dos superplastificantes na melhoria da resistência mecânica do concreto com agregado reciclado foi observada em estudos de Alves *et al.* (2014), que utilizaram 1% de superplastificante em relação à massa de cimento em microconcretos com 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado de louças sanitárias. Os autores verificaram incrementos de 28% na resistência à compressão axial e 17% na resistência à tração por compressão diametral em comparação ao concreto de referência. Esse comportamento foi atribuído à capacidade do superplastificante de evitar a aglutinação das partículas de agregado, melhorando a dispersão da mistura. Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira *et al.* (2012), que analisaram concretos com agregados reciclados de concreto, registrando aumentos de 34,80% na resistência à compressão com o uso de um superplastificante comum e 69,50% com um superplastificante de alto desempenho. Portanto, observa-se que os ganhos de resistência são proporcionais à eficiência dos aditivos na redução da relação a/c da mistura (Barbudo *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2012). No entanto, é importante destacar que o efeito positivo do superplastificante pode ser reduzido pela baixa qualidade dos agregados reciclados, sendo essa influência mais significativa em concretos contendo agregados reciclados mistos, e menos expressivos quando se utiliza agregado reciclado de concreto (Bravo *et al.*, 2017).

2.5 Fibras de aço

De acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2019) as fibras de aço são filamentos descontínuos obtidos a partir de arames de aço trefilados a frio, retos ou em outras conformações, cortes, retos ou em outras conformações, de chapas; fibras produzidas por fusão (*melt-extracted*); fibra de arame trefilados a frio refilado (*shaved*) e as fibras usinadas a partir de blocos de aço adequados para formar misturas homogêneas com concretos e argamassas. De modo geral, os comprimentos das fibras de aço variam de 12 mm a 63,50 mm, enquanto os diâmetros mais comuns estão entre 0,04 mm a 0,50 mm. Quanto à geometria, podem apresentar seções transversais arredondadas, ovais ou retangulares, cujas dimensões dependem do processo de produção e do material utilizado. A incorporação dessas fibras na matriz cimentícia varia entre 0,25% a 2% em volume, o que equivale a uma dosagem entre 20 kg/m³ a 157 kg/m³ (Dixon *et al.*, 2002).

Com base em sua geometria, comprimento, diâmetro e relação de aspecto (l/d) as fibras podem ser subdivididas em duas categorias: microfibras e macrofibras. As microfibras possuem diâmetro inferior a 0,30 mm e comprimento entre 6 mm e 12 mm, sendo caracterizadas por sua elevada superfície específica e melhor dispersão na matriz cimentícia. Sua utilização é particularmente eficaz para o controle de microfissuração na fase inicial do endurecimento do concreto, a redução da retração plástica e retração térmica, a melhoria na resistência ao impacto e à abrasão, e o aprimoramento da coesão da mistura, reduzindo a segregação dos constituintes. Devido ao seu tamanho reduzido, as microfibras não contribuem significativamente para o aumento da resistência pós-fissuração, mas desempenham um papel importante na durabilidade do concreto e na limitação da propagação inicial de fissuras (Rambo *et al.*, 2014). As macrofibras possuem diâmetro superior a 0,30 mm e comprimentos variando entre 25 mm e 60 mm, apresentando uma l/d entre 40 e 100. Essas fibras são utilizadas para reforço estrutural e oferecem benefícios como: aumento da resistência residual pós-fissuração, melhoria da capacidade de carga e resistência à flexão, maior controle da fissuração em elementos estruturais submetidos a esforços de tração e flexão e redução da necessidade de armadura convencional em algumas aplicações, como pisos industriais e túneis. As macrofibras são utilizadas em aplicações que exigem alto desempenho estrutural, incluindo pavimentos de concreto, estruturas pré-moldadas e elementos submetidos a solicitações dinâmicas intensas (Bentur & Mindess, 2007; Richardson *et al.*, 2009). O contínuo avanço nas pesquisas científicas sobre fibras de aço tem ampliado suas aplicações estruturais, tornando o concreto reforçado um material mais seguro, durável e eficiente.

2.6 Concreto Reforçado com Fibras de aço (CRFA)

As fibras de aço são amplamente utilizadas no reforço de concretos, promovendo melhorias no desempenho mecânico e no controle de fissuração. Esse reforço tem se mostrado eficaz na mitigação da fragilidade e da baixa tenacidade das matrizes cimentícias, características diretamente relacionadas à capacidade de absorção de energia do material. Além disso, sua incorporação proporciona ganhos expressivos na resistência a ações dinâmicas e de impacto, aumento da ductilidade e aprimoramento do desempenho pós-fissuração, tornando-se uma alternativa promissora para diversas aplicações estruturais (Bentur & Mindess, 2007; Carnio, 2017).

Os ensaios de tração à flexão a quatro pontos são amplamente utilizados para avaliar o comportamento pós-fissuração de CRFA, uma vez que permitem analisar a resistência

residual, a tenacidade e a ductilidade do material sob carregamento distribuído. Diversos estudos indicam que a presença de fibras altera significativamente a resposta mecânica do concreto, especialmente na fase pós-fissuração, retardando a propagação de trincas e garantindo maior capacidade de absorção de energia. Assim, mesmo após a fissuração, o concreto mantém uma resistência residual aos esforços aplicados, reduzindo a probabilidade de ruptura frágil e conferindo maior tenacidade ao material. No entanto, a incorporação de fibras de aço deve ser controlada, uma vez que teores elevados podem comprometer a trabalhabilidade da mistura, dificultando a compactação e aumentando a porosidade da matriz cimentícia, o que pode resultar na redução da resistência mecânica do compósito (Figueiredo & Ceccato, 2015). Por outro lado, quando utilizadas em proporções adequadas, as fibras exercem influência limitada na resistência à compressão, ao passo que promovem uma melhora significativa no comportamento do material sob tração na flexão (Figueiredo, 2011).

Uma das principais vantagens do CRFA está na distribuição aleatória das fibras na matriz cimentícia, garantindo o reforço de todo o elemento estrutural. Essa característica torna o CRFA especialmente vantajoso para aplicações em estruturas submetidas a esforços distribuídos, sem concentração de tensões em regiões específicas (Jansson, 2008), além de possibilitar uma redistribuição eficiente das tensões (Di Prisco *et al.*, 2009). Além disso, as fibras podem substituir total ou parcialmente a armadura convencional, simplificando o processo de fabricação de elementos estruturais ao reduzir ou eliminar a necessidade de montagem da armadura. Como consequência, há uma diminuição no tempo de execução da obra e na geração de desperdícios de materiais, otimizando a eficiência construtiva (Liao *et al.*, 2015).

Segundo Wu *et al.* (2022), o aumento do teor volumétrico de fibras (até 1,50%) e o comprimento das fibras (20 mm a 25 mm) contribuiu para quase dobrar a resistência à flexão em relação ao concreto sem reforço, destacando o papel do comprimento crítico das fibras no processo de transferência de tensões. Esses resultados indicam a eficácia do ensaio na caracterização da contribuição estrutural das fibras, pois permitem observar de forma clara a interação entre fissuração, tração residual e capacidade de redistribuição de esforços. Ademais, estudos com concretos autoadensáveis reforçados com fibras híbridas demonstram que a utilização conjunta de fibras macro e meso favorece o controle da abertura de fissuras e incrementa a ductilidade, ressaltando a importância da geometria, do volume e da combinação das fibras na resposta mecânica.

Essas vantagens tornam o CRFA uma solução viável para diversas aplicações estruturais, incluindo pavimentos industriais e aeroportuários, taludes, almofadas de apoio de

pontes, tubos de concreto e, principalmente, o revestimento de túneis, seja por meio de aduelas pré-moldadas ou em associação com o concreto projetado.

Além de promover reforço estrutural, a adição de fibras está diretamente relacionada ao aumento da durabilidade do concreto. A presença dessas fibras, combinada a um teor adequado de cimento e uma baixa relação a/c, contribui para a redução da permeabilidade, desde que o concreto seja devidamente compactado e curado. Para que esse benefício seja efetivo, é essencial que as fibras permaneçam completamente envolvidas pela pasta de cimento, de modo a inibir os processos de corrosão, erosão e cavitação, bem como a aumentar a resistência ao impacto, assegurando a servicibilidade e a durabilidade da estrutura (Mehta & Monteiro, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo está dividido em dois itens: o item 3.1 apresenta a caracterização dos materiais utilizados, enquanto o item 3.2 descreve os métodos experimentais aplicados na produção e na avaliação das propriedades nos estados fresco e endurecido, bem como na avaliação qualitativa da distribuição das fibras nos microconcretos.

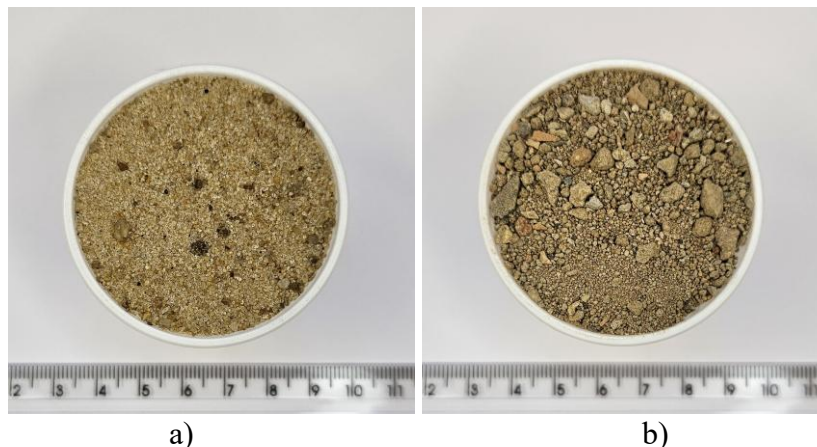
3.1 Materiais

Os itens 3.1.1 a 3.1.5 apresentam as características físicas, químicas e mecânica dos materiais utilizados na produção dos microconcretos, incluindo agregados miúdos (natural e reciclado), materiais cimentícios (cimento, cinza volante e sílica da casca de arroz), aditivo químico, fibras de aço e água.

3.1.1 Agregados

Dois tipos de agregado miúdo foram utilizados na produção dos microconcretos. O primeiro de origem natural, extraído do rio Ibicuí, localizado em Manoel Viana-RS e o segundo reciclado, obtido a partir da reciclagem de RCC, fornecido pela empresa SBR Reciclagem, unidade de Canoas-RS. Os agregados foram inicialmente submetidos à secagem em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ durante 24 h, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), sendo posteriormente armazenados em ambiente de laboratório. A Figura 1 mostra os agregados utilizados.

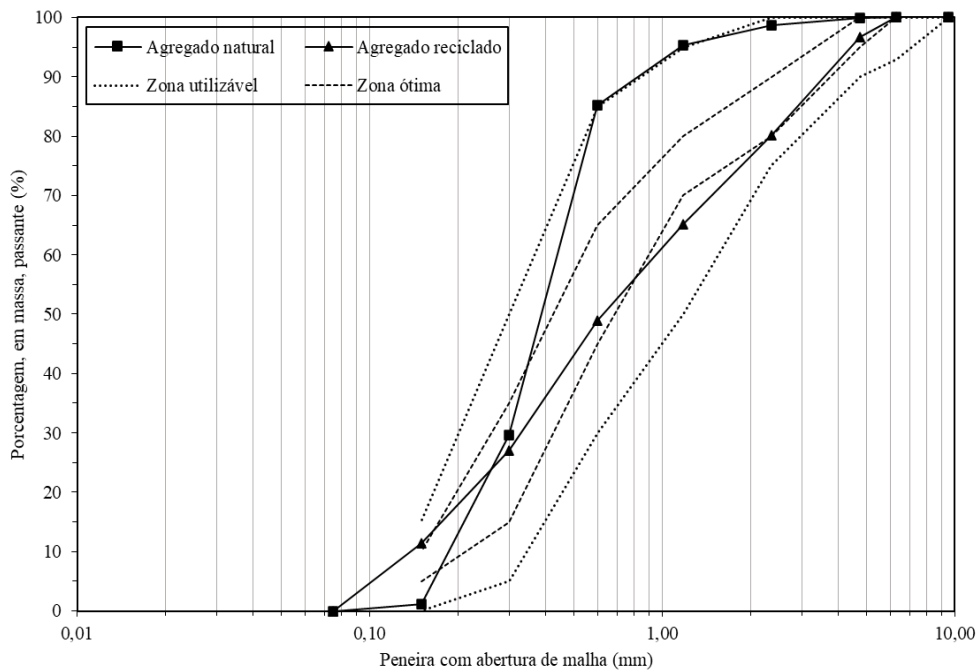
Figura 1 – Agregados: a) natural de rio e b) reciclado de RCC



Fonte: Elaboração própria.

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada através do ensaio de peneiramento, conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 17054 (ABNT, 2022). As curvas granulométricas obtidas estão mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Curvas granulométricas dos agregados natural e reciclado, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022)



Fonte: Elaboração própria.

A distribuição granulométrica dos agregados (Figura 2) atende aos limites normativos recomendados. O agregado natural de rio tem dimensão máxima característica de 1,18 mm e módulo de finura de 1,90. O agregado reciclado de RCC apresenta dimensão máxima de 4,75 mm e módulo de finura de 2,71.

A composição do agregado reciclado de resíduos classe A foi obtida por análise visual com auxílio de lupa, seguindo os critérios de classificação estabelecidos na norma NBR 15116 (ABNT, 2021). Os grãos foram categorizados em quatro grupos: grupo 1 (G1): fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do seu volume; grupo 2 (G2): fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do seu volume; grupo 3 (G3): fragmentos de cerâmica vermelha, com superfície não esmaltada, em mais de 50% do seu volume; grupo 4 (G4): fragmentos de materiais indesejáveis, de natureza orgânica, como madeiras, plásticos, betumes e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como metais, vidros, cerâmica branca esmaltada e gesso. Além disso, foi identificada a subclasse do

agregado reciclado, a partir do teor de cerâmica vermelha ou branca não polida (G3), sendo: agregado reciclado de concreto (ARCO) = 0%, agregado reciclado cimentício (ARCI) \leq 10% e agregado reciclado misto (ARM) \leq 40%. A Figura 3 mostra a imagem dos grãos classificados por grupo, e a Tabela 1 apresenta as respectivas porcentagens em massa de cada grupo identificado na amostra.

Figura 3 – Grãos do agregado reciclado classificados por grupo, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021)



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 1 – Porcentagens em massa dos grupos de fragmentos identificados no agregado reciclado, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021)

| Grupo de fragmento | Teor (%) |
|-----------------------------|-----------------|
| G1 – pasta de cimento | 50,98 |
| G2 – rocha | 25,64 |
| G3 – cerâmica vermelha | 19,24 |
| G4 – materiais indesejáveis | 4,14 |

Fonte: Elaboração própria.

O agregado reciclado contém 19,24% de cerâmica vermelha em sua composição e, portanto, é classificado como ARM. Na etapa seguinte, os agregados natural de rio e reciclado de RCC foram separados em duas faixas granulométricas, de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), utilizando-se um agitador de peneiras mecânico da marca Solotest (Figura 4). Esse procedimento baseou-se na distribuição granulométrica proposta por Formagini (2005),

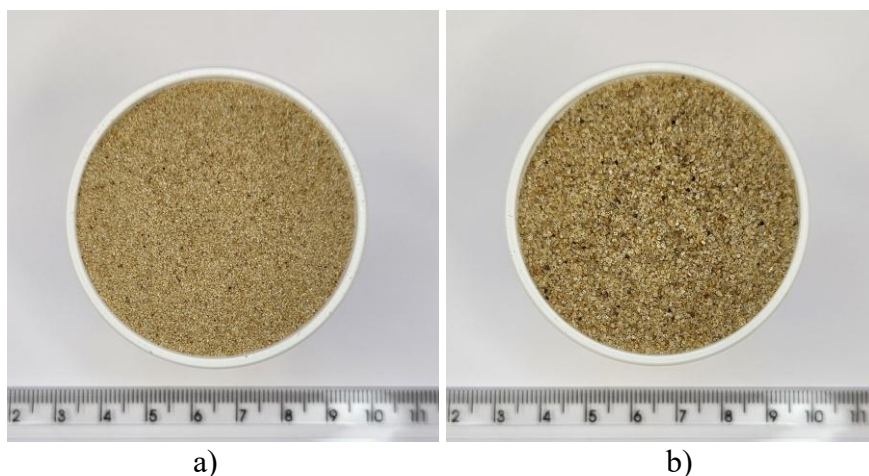
adotada como referência na produção dos microconcretos avaliados neste estudo. Cada faixa corresponde à fração que passa 100% pela peneira de abertura i e fica totalmente retida na peneira de abertura inferior $i+1$. O diâmetro máximo dos agregados foi limitado a 600 μm , sendo a primeira faixa formada por partículas entre 150 μm e 300 μm , e a segunda faixa, por partículas entre 425 μm e 600 μm . Após o peneiramento, os agregados foram identificados de acordo com sua procedência: o de origem natural de rio foi designado como AN, e o reciclado de RCC, como AR, seguidos do número correspondente à peneira de retenção. Assim, adotaram-se as denominações AN150, AN425, AR150 e AR425, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 4 – Agitador de peneiras mecânico



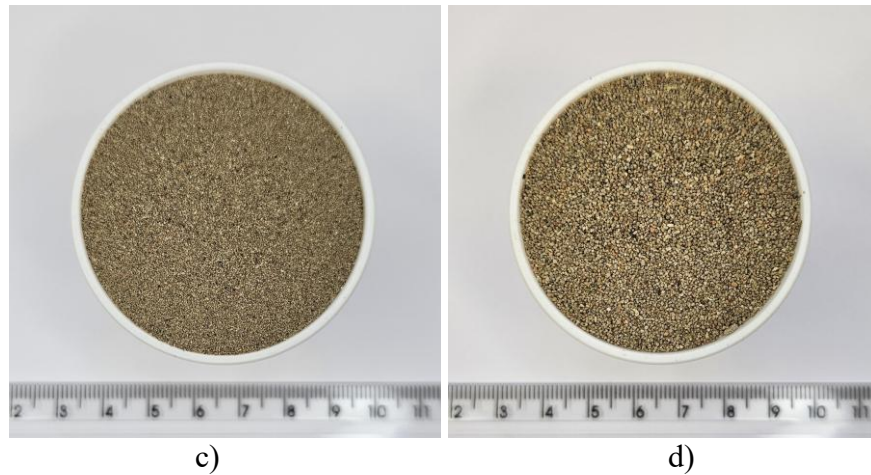
Fonte: Elaboração própria.

Figura 5 – Agregados miúdos separados por faixa granulométrica, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022): a) AN150, b) AN425, c) AR150 e d) AR425



a)

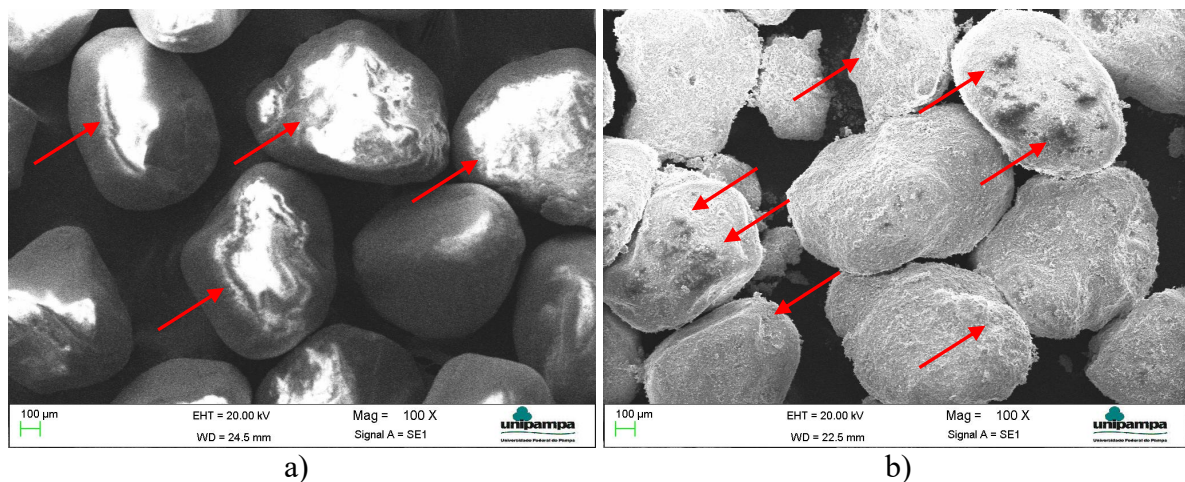
b)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6 mostra as imagens dos agregados com dimensões entre 425 μm e 600 μm , obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com ampliação de 100 vezes, utilizando o equipamento Evo MA10 da marca Zeiss. Observa-se que o agregado natural de rio tem superfícies mais lisas e compactas, visualmente identificadas pelas regiões mais iluminadas na imagem, destacadas pelas setas vermelhas. A menor porosidade está relacionada à sua composição mineralógica predominantemente uniforme. Enquanto, o agregado reciclado de RCC apresenta superfícies mais rugosas e irregulares, além de maior porosidade, resultante da presença de pasta de cimento aderida e de materiais heterogêneos, também indicados pelas setas vermelhas.

Figura 6 – Imagens obtidas por MEV (100x) dos agregados com dimensões entre 425 μm e 600 μm : a) natural e b) reciclado



Fonte: Elaboração própria.

As densidades dos agregados nas condições seca (ρ_s) e saturada superfície seca (ρ_{sss}), bem como a absorção de água (Abs), foram determinadas de acordo com a NBR 16916 (ABNT 2021). A Tabela 2 apresenta os resultados das densidades e da absorção de água dos agregados.

Tabela 2 – Resultados das densidades e absorção de água dos agregados, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021)

| Parâmetro | Faixa granulométrica do agregado | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|
| | AN* | AN150 | AN425 | AR* | AR150 | AR425 |
| ρ_s^* (g/cm ³) | 2,54 | 2,60 | 2,58 | 2,11 | 1,92 | 2,07 |
| ρ_{sss}^* (g/cm ³) | 2,54 | 2,60 | 2,58 | 2,23 | 2,09 | 2,19 |
| Abs* (%) | 0,19 | 0,15 | 0,13 | 4,75 | 8,55 | 5,17 |

* ρ_s = densidade do agregado na condição seca; ρ_{sss} = densidade do agregado na condição saturada superfície seca; Abs = absorção de água; AN = agregado natural de rio; AR = agregado reciclado de RCC.

Fonte: Elaboração própria.

A composição química nas faixas granulométricas do agregado reciclado (AR150 e AR425) foi determinada por espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), conforme apresentada na Tabela 3. As análises foram realizadas no equipamento Epsilon 1, da marca Malvern Panalytical, disponível no laboratório do Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI).

Tabela 3 – Composição química das faixas granulométricas do agregado reciclado determinada por FRX

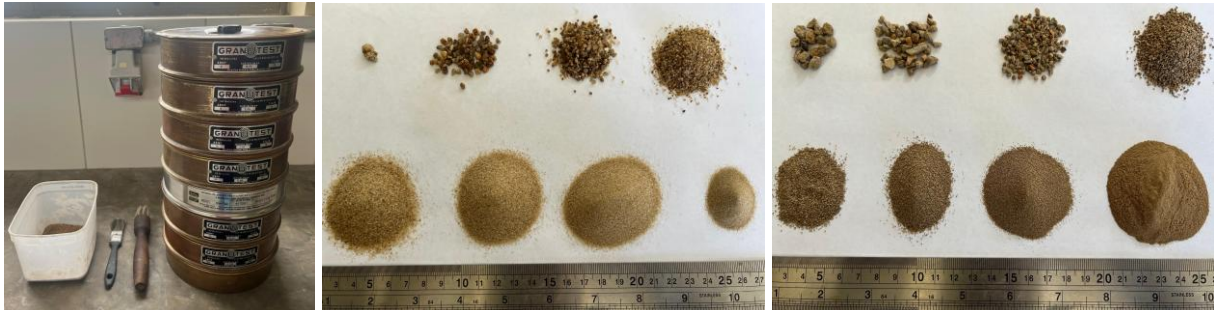
| Composto | Faixa granulométrica do agregado reciclado | |
|------------------------------------|--|--------|
| | AR150 | AR425 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 10,135 | 10,011 |
| SiO ₂ (%) | 52,065 | 51,494 |
| K ₂ O (%) | 2,230 | 1,558 |
| CaO (%) | 23,556 | 26,956 |
| TiO ₂ (%) | 1,591 | 1,335 |
| Cr ₂ O ₃ (%) | 0,020 | 0,016 |
| MnO (%) | 0,293 | 0,153 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 9,900 | 8,297 |
| CuO (%) | 0,012 | 0,010 |
| ZnO (%) | 0,048 | 0,035 |
| ZrO ₂ (%) | 0,136 | 0,122 |
| PbO (%) | 0,016 | 0,013 |

Fonte: Elaboração própria.

A análise da composição química das diferentes faixas granulométricas do agregado reciclado evidencia características compatíveis com sua origem heterogênea. Os principais óxidos identificados foram o dióxido de silício (SiO₂) e o óxido de cálcio (CaO), seguidos, em menores proporções, pelo óxido de alumínio (Al₂O₃) e pelo óxido de ferro (Fe₂O₃), conforme apresentado na Tabela 3. De acordo com Ângulo (2005), a presença desses óxidos no agregado reciclado de RCC está relacionada à composição mineralógica de partículas oriundas da pasta de cimento endurecida, de agregados naturais e de materiais cerâmicos, como a cerâmica vermelha. Dessa forma, os teores de SiO₂ e CaO podem ser atribuídos, principalmente, à presença de compostos cimentícios hidratados derivados de concretos e argamassas, enquanto os óxidos de ferro e de alumínio possivelmente se originam de fragmentos cerâmicos incorporados aos resíduos (Ferreira, 2017).

A Figura 7 ilustra alguns procedimentos adotados nos ensaios de caracterização dos agregados.

Figura 7 – Procedimentos realizados: a) composição granulométrica e b) densidades e absorção de água, conforme as normas NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 16916 (ABNT, 2021)



a)



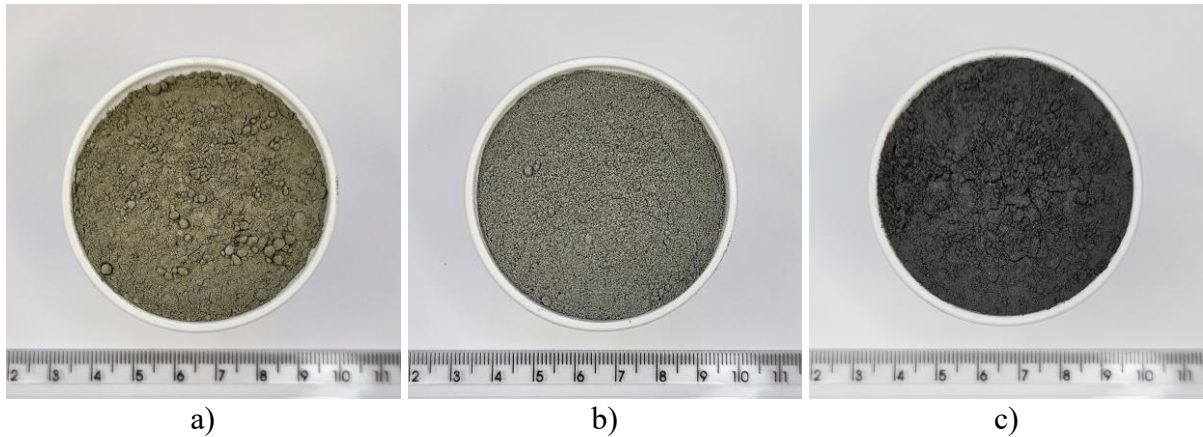
b)

Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Materiais cimentícios

Os materiais cimentícios utilizados na produção dos microconcretos foram o cimento Portland CP V-ARI, da marca Itambé, a cinza volante, proveniente da empresa Pozo Fly, localizada em Capivari de Baixo-SC e a sílica da casca de arroz (SCA), fornecida pelo Grupo Pilecco Nobre, da cidade de Alegrete-RS. A SCA é obtida por meio da queima controlada, a aproximadamente 750 °C, da casca de arroz em leito fluidizado para a geração de energia elétrica, processo que resulta em um material com estrutura predominantemente amorfa. A Figura 8 mostra os materiais cimentícios.

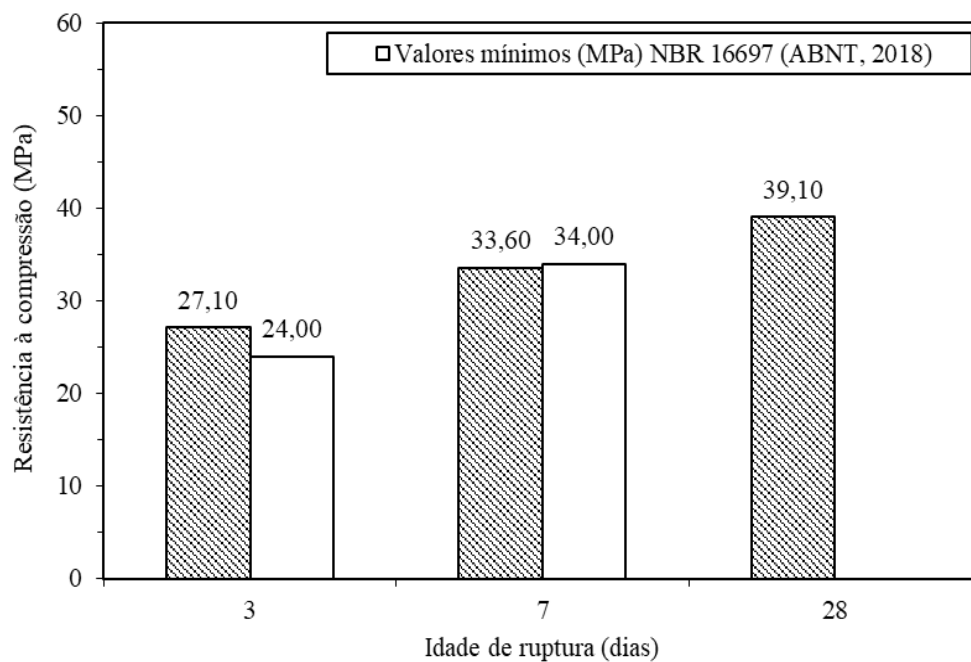
Figura 8 – Materiais cimentícios: a) CP V-ARI, b) cinza volante e c) SCA



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 9 apresenta os resultados de resistência à compressão axial do CP V-ARI, determinados conforme a norma NBR 7215 (ABNT, 2019).

Figura 9 – Resultados de resistência à compressão do CP V-ARI, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019)



Fonte: Elaboração própria.

A composição química dos materiais cimentícios foi determinada por FRX, utilizando o espectrômetro de bancada Epsilon 1. A massa específica do CP V-ARI, da cinza volante e da SCA foi obtida pelo método do frasco de Le Chatelier, de acordo com a norma NBR 16605

(ABNT, 2017). A composição química e a massa específica dos materiais cimentícios estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Composição química dos materiais cimentícios determinada por FRX

| Composto | Material | | |
|------------------------------------|----------|---------------|--------|
| | CP V-ARI | Cinza volante | SCA |
| Al ₂ O ₃ (%) | 2,723 | 22,050 | - |
| SiO ₂ (%) | 13,734 | 60,138 | 94,789 |
| SO ₃ (%) | 3,549 | 0,903 | 0,249 |
| K ₂ O (%) | 1,166 | 4,637 | 2,412 |
| CaO (%) | 74,706 | 2,691 | 1,982 |
| TiO ₂ (%) | - | 1,660 | - |
| Cr ₂ O ₃ (%) | - | 0,028 | - |
| MnO (%) | - | 0,070 | 0,477 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 3,743 | 7,535 | 0,089 |
| CuO (%) | - | 0,012 | 0,002 |
| ZnO (%) | - | 0,057 | - |
| Rb ₂ O (%) | - | 0,048 | - |
| SrO (%) | 0,379 | 0,035 | - |
| ZrO ₂ (%) | - | 0,136 | - |

Fonte: Elaboração própria.

Através da composição química dos materiais cimentícios é possível observar a predominância do óxido de cálcio (CaO) na composição do CP V-ARI, o que era esperado, uma vez que o calcário constitui a principal matéria-prima para a fabricação desse ligante. Na cinza volante, os óxidos predominantes foram o dióxido de silício (SiO₂) e o óxido de alumínio (Al₂O₃), enquanto, na SCA, observou-se uma elevada concentração de dióxido de silício (SiO₂). A NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece que, para serem classificados como materiais pozolânicos, determinados requisitos químicos devem ser atendidos. Com base na análise química realizada e nos critérios definidos pela referida norma, tanto a cinza volante quanto a SCA podem ser classificadas como materiais pozolânicos do tipo E, visto que o somatório dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ ultrapassa 50% da composição total.

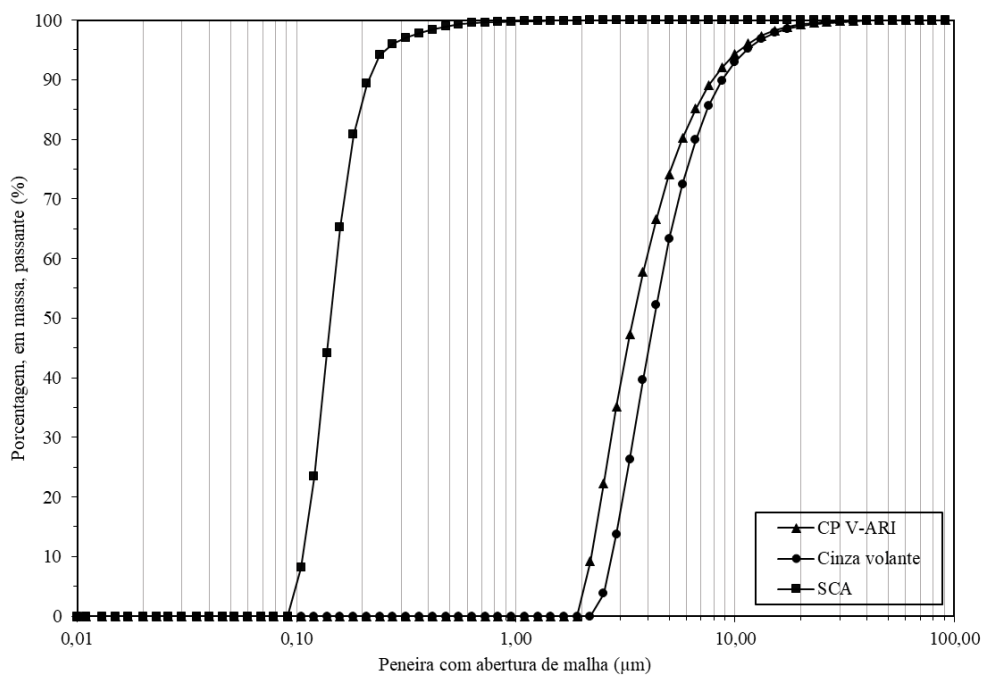
Tabela 5 – Massa específica dos materiais cimentícios obtida pelo método do frasco de Le Chatelier, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017)

| Material | Massa específica (g/cm ³) |
|---------------|---------------------------------------|
| CP V-ARI | 3,08 |
| Cinza volante | 2,04 |
| SCA | 2,10 |

Fonte: Elaboração própria.

A distribuição granulométrica do CP V-ARI, da cinza volante e da SCA (Figura 10) foi determinada pelo ensaio de granulometria a laser, utilizando o equipamento Malvern Mastersizer 2000, disponível no Laboratório de Nanobiotecnologia (LABNANO) da UNIPAMPA, campus Uruguaiiana-RS.

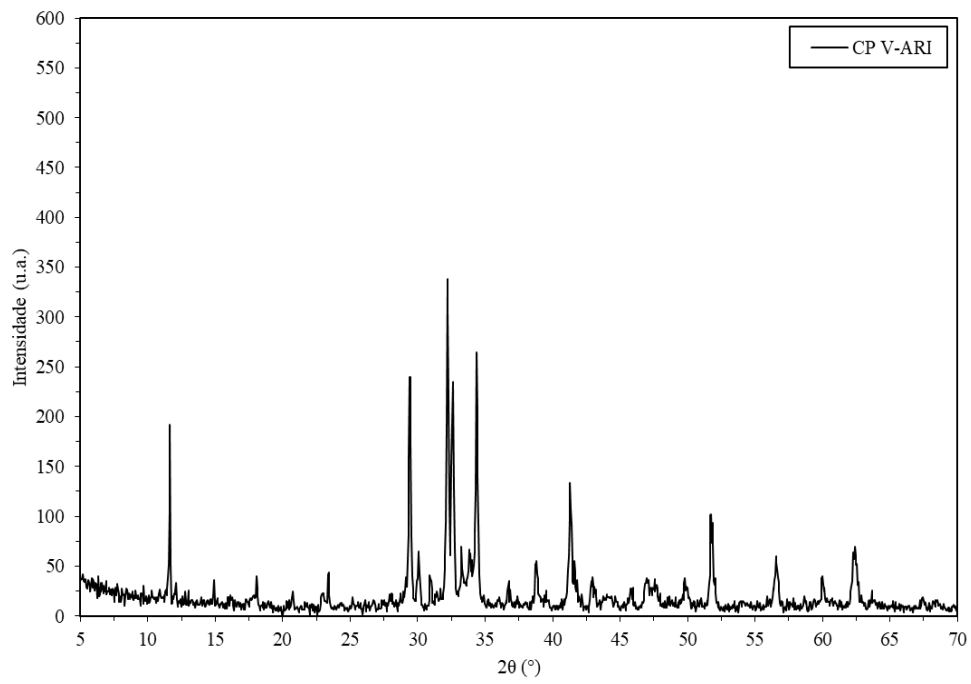
Figura 10 – Curvas granulométricas dos materiais cimentícios obtidas por granulometria a laser



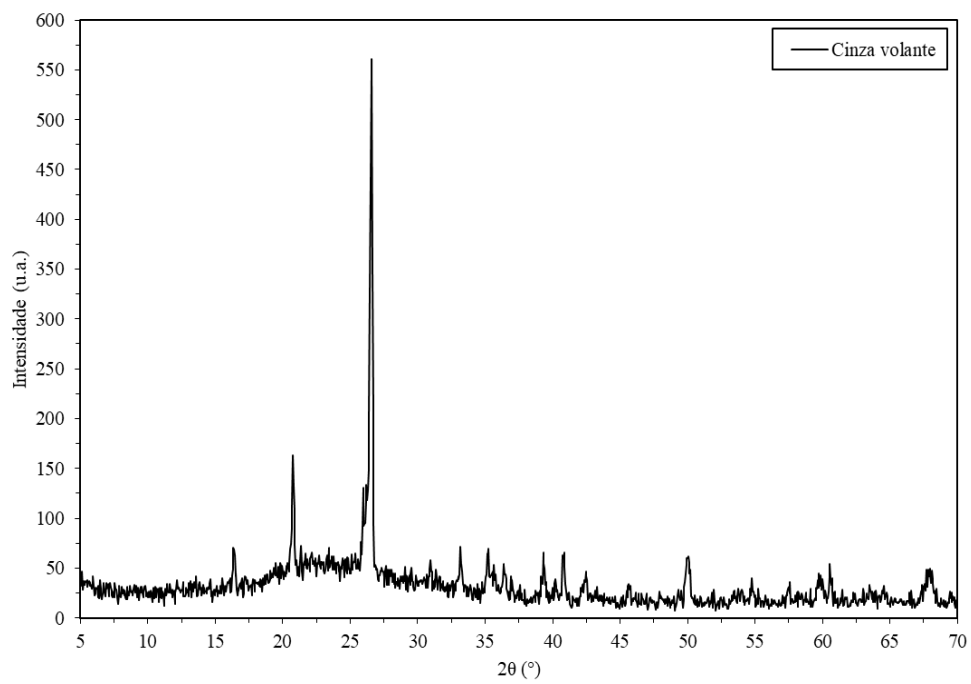
Fonte: Elaboração própria.

A caracterização mineralógica dos materiais cimentícios foi realizada por Difração de Raios-X (DRX), conforme apresentada na Figura 11. Parte dos procedimentos desenvolvidos nos ensaios de caracterização dos materiais cimentícios está ilustrada na Figura 12.

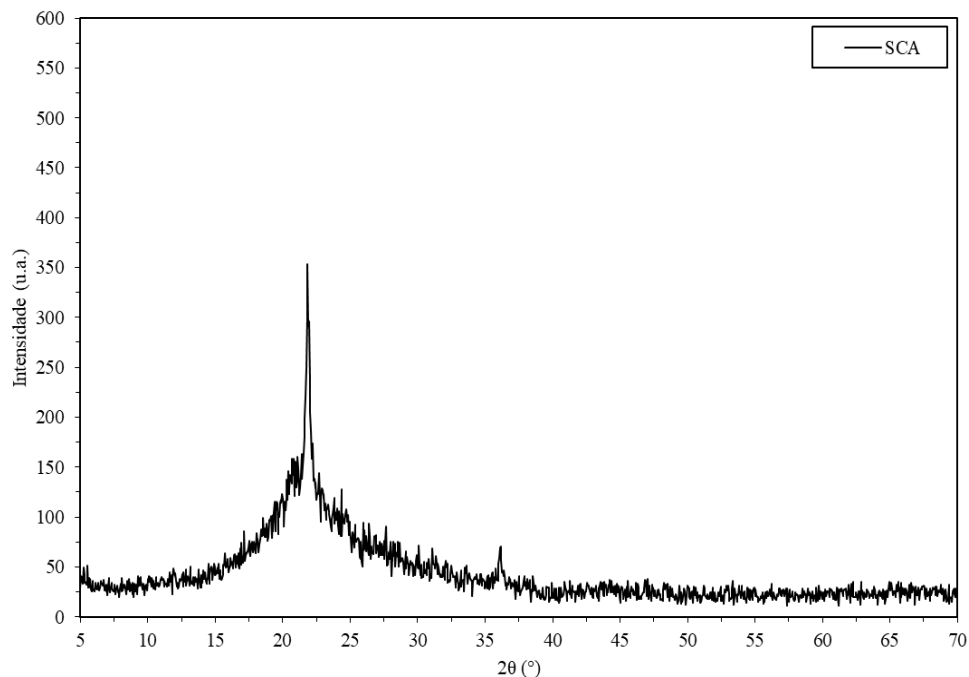
Figura 11 – Caracterização mineralógica dos materiais cimentícios determinada por DRX: a) CP V-ARI, b) cinza volante e c) SCA



a)



b)



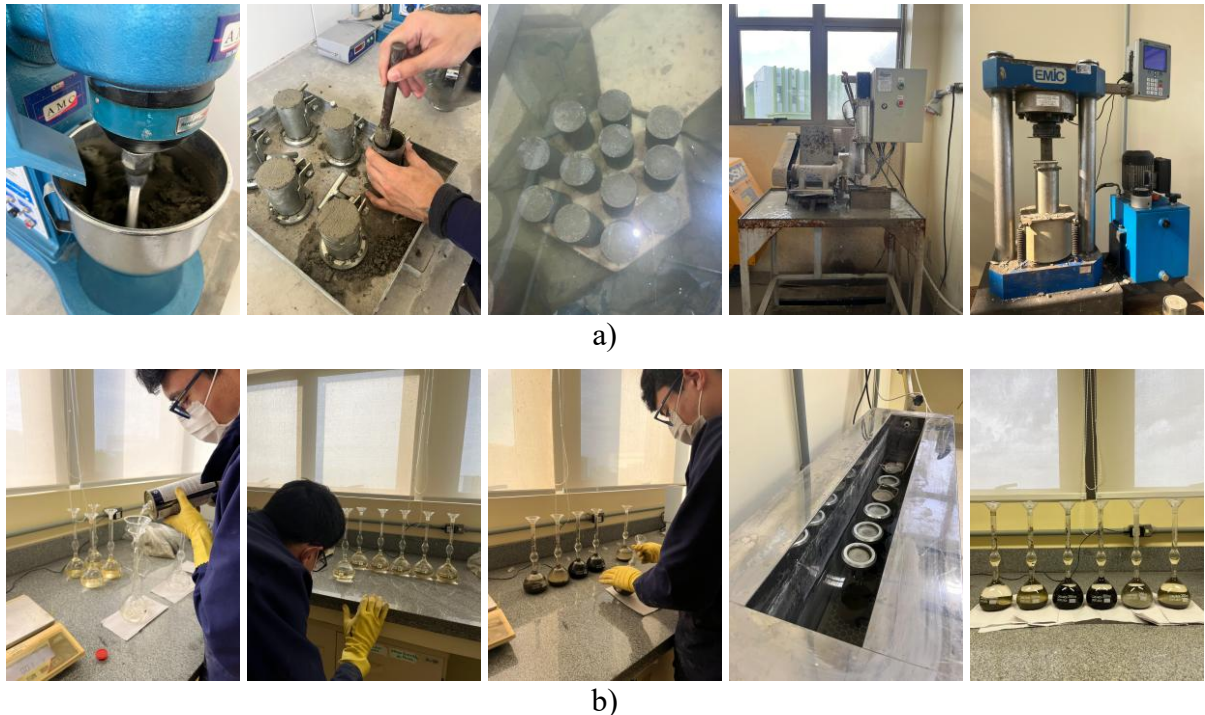
c)

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos difratogramas obtidos foi realizada com base em dados da literatura, permitindo a associação dos picos de maior intensidade às fases minerais características de cada material avaliado. No difratograma do CP V-ARI, observou-se a presença de picos de alta intensidade em torno de $2\Theta \approx 32^\circ$, atribuídos à alita (C_3S), fase responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica nas idades iniciais. Além disso, foram identificadas as fases belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), todas formadas a partir da reação entre calcário e argila durante o processo de clinquerização. Esses resultados estão em conformidade com o que foi descrito por Taylor (1997). A análise do difratograma da cinza volante evidenciou um halo difuso entre 15° e 35° (2Θ), indicando uma estrutura predominantemente amorfa, composta por sílica e alumina reativas. Contudo, também foi identificado um pico nítido em $2\Theta \approx 26^\circ$, associado à presença de quartzo (SiO_2), além de picos secundários compatíveis com a presença de mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) e, em alguns casos, hematita (Fe_2O_3). Tais resultados confirmam a composição típica desse resíduo industrial, conforme Feng *et al.* (2011), e indicam um potencial pozolânico significativo devido à elevada fração vítrea. O difratograma da SCA, calcinada sob condições controladas a aproximadamente $750^\circ C$, apresentou um halo difuso entre 15° e 30° (2Θ), evidenciando sua estrutura amorfa. A ausência de picos cristalinos indica alta reatividade pozolânica, conforme relatado por Rajamane *et al.* (2014). Em contrapartida, estudos anteriores (Mehta, 1992) apontam que, quando a SCA é submetida a temperaturas superiores a $800^\circ C$, ocorrem

transformações estruturais que resultam na formação de cristobalita, tridimita e quartzo, reduzindo sua atividade pozolânica.

Figura 12 – Procedimentos realizados: a) resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos e b) massa específica, de acordo com as normas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 16605 (ABNT, 2017)



Fonte: Elaboração própria.

3.1.3 Aditivo químico

Foi utilizado o superplastificante sintético MC-PowerFlow 4001, à base de policarboxilatos (PCE), fornecido e desenvolvido pela empresa MC-Bauchemie Indústria e Comércio Ltda. Trata-se de um líquido marrom (Figura 13), indicado para concretos com baixa quantidade de água e elevada trabalhabilidade. O teor de sólidos e a massa específica do aditivo químico foram determinados conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 11768-3 (ABNT, 2019).

Figura 13 – Superplastificante MC-PowerFlow 4001



Fonte: Elaboração própria.

As propriedades do superplastificante utilizado na produção dos microconcretos estão apresentadas na Tabela 6, enquanto algumas etapas do procedimento de caracterização são ilustradas na Figura 14.

Tabela 6 – Propriedades do superplastificante, segundo a norma NBR 11768-3 (ABNT, 2019)

| Propriedade | Superplastificante |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Teor de sólidos (%) | 47,43 |
| Massa específica (g/cm ³) | 1,10 |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 – Etapas do procedimento de caracterização do aditivo químico: a) teor de sólidos e b) massa específica, conforme a norma NBR 11768-3 (ABNT, 2019)



a)



b)

Fonte: Elaboração própria.

3.1.4 Fibras de aço

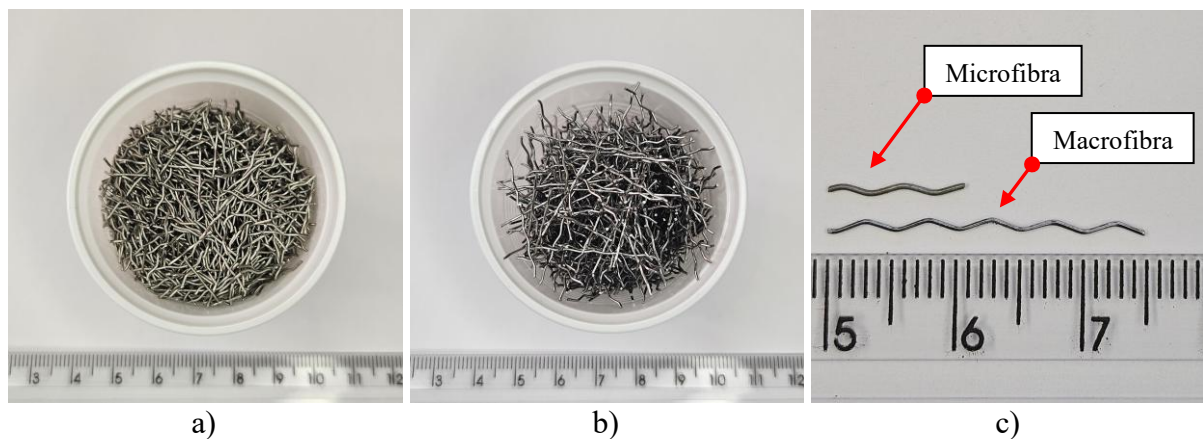
Foram utilizadas microfibras e macrofibras de aço inox AISI 304, produzidas e comercializadas pela Astra Fibras Metálicas. Ambas apresentam conformação ondulada e diâmetro de 0,50 mm, diferenciando-se quanto ao comprimento e, conseqüentemente, à relação de aspecto (l/d). A classificação entre micro e macrofibras baseia-se, principalmente, no comprimento das fibras e na função estrutural que desempenham no compósito. Fibras com comprimento inferior a 15 mm são classificadas como microfibras, sendo utilizadas para o controle de fissuração inicial, enquanto aquelas com comprimento superior a 15 mm são classificadas como macrofibras, contribuindo significativamente para a resistência residual e o comportamento pós-fissuração do material. Neste estudo, as microfibras, denominadas Astra 24/12, possuem 12 mm de comprimento e l/d de 24, enquanto as macrofibras, identificadas como Astra 50/25, têm 25 mm de comprimento e l/d de 50. A Tabela 7 apresenta as principais características das fibras utilizadas, de acordo com as especificações da fabricante, e a Figura 15 ilustra as fibras de aço.

Tabela 7 – Características das fibras de aço, de acordo com a fabricante

| Especificação | Fibra de aço | |
|---------------------------------------|--------------|------------|
| | Microfibra | Macrofibra |
| Comprimento (mm) | 12,00 | 25,00 |
| Diâmetro (mm) | 0,50 | 0,50 |
| Relação de aspecto (l/d) | 24 | 50 |
| Quantidade de fibra/kg | 57143 | 25510 |
| Módulo de elasticidade à 870 °C (MPa) | 12,40 | 12,40 |
| Resistência à tração 870 °C (MPa) | 124,00 | 124,00 |

Fonte: Fornecida pela Astra Fibras Metálicas (2014).

Figura 15 – Fibras metálicas: a) microfibras Astra 24/12, b) macrofibras Astra 50/25 e c) formato das fibras



Fonte: Elaboração própria.

3.1.5 Água

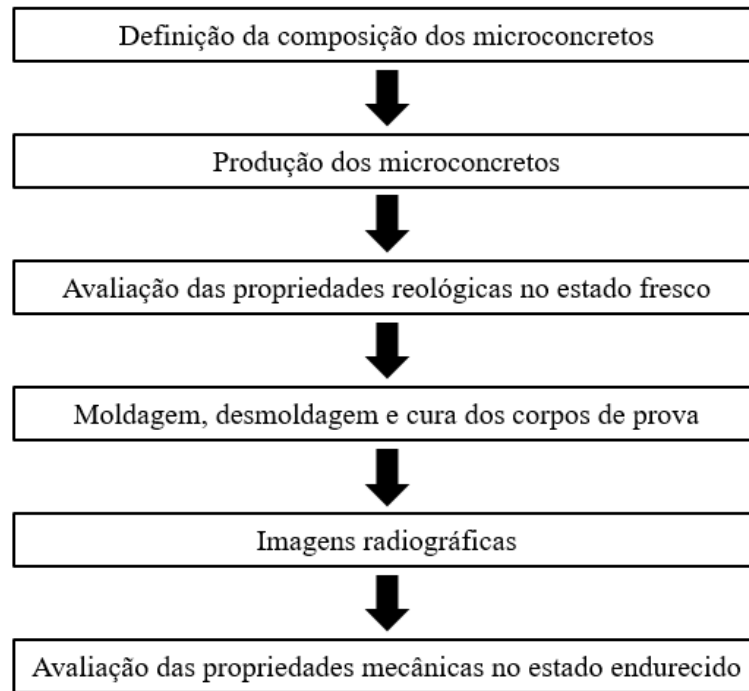
A água utilizada na produção dos microconcretos foi obtida do sistema de abastecimento da cidade de Alegrete-RS.

3.2 Métodos experimentais

Neste item, apresentam-se os procedimentos experimentais adotados para a produção dos microconcretos, a avaliação das propriedades no estado fresco, a moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova (CPs), a avaliação das propriedades no estado

endurecido e a análise da distribuição das fibras de aço nas misturas. A Figura 16 ilustra o fluxograma das etapas que compõem o programa experimental.

Figura 16 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaboração própria.

3.2.1 Definição da composição dos microconcretos

A mistura de referência adotada neste estudo baseou-se na composição proposta por Formagini (2005). Em sua tese de doutorado, o autor desenvolveu um microconcreto correlacionando o empacotamento máximo de materiais granulares secos com um procedimento físico de compactação dos grãos, utilizando um protocolo de empacotamento de índice $K = 9$. O objetivo foi atingir uma resistência à compressão de 160 MPa aos 28 dias de idade, através do software MECFOR. Ensaio piloto foram realizados para ajustar parâmetros essenciais à execução deste estudo. A partir dos resultados obtidos, foram realizadas adaptações nos materiais utilizados, de modo a adequá-los aos materiais disponíveis no grupo de Modelagem e Análise Experimental de Compósitos (MAEC). As principais modificações envolveram as substituições do CP III 40 pelo CP V-ARI, da sílica ativa e da sílica flour #425 pela SCA, bem como da fibra de wollastonita pela cinza volante, devido à similaridade da distribuição granulométrica dos materiais. Além dessas alterações, optou-se pela retirada das fibras de aço com $l/d = 67$ da mistura de referência.

Cinco misturas de microconcretos foram produzidas, sendo uma mistura contendo agregado natural de rio e quatro misturas com substituição total do agregado natural de rio por agregado reciclado de RCC. Em três dessas misturas com agregado reciclado, foram incorporados dois tipos de fibras de aço, mantendo-se constante o teor volumétrico de 2%. A primeira mistura foi reforçada com microfibras de 12 mm de comprimento e l/d de 24, a segunda, com macrofibras de 25 mm de comprimento e l/d de 50, e a terceira, com hibridização do reforço, combinando microfibras (0,67%) e macrofibras (1,33%), conforme a proporção estabelecida por Rambo (2012). A relação água/cimento (a/c) foi mantida constante em 0,16 para todas as misturas. No entanto, para as misturas contendo agregado reciclado, foi necessária a correção da absorção de água, visto que esse material demanda 25 vezes mais água do que o agregado natural. Para isso, somou-se a quantidade de agregado reciclado utilizada na mistura e multiplicou-se pela porcentagem de absorção de água do agregado (4,75%). Além disso, essas misturas necessitaram de um acréscimo de 24% no superplastificante para atender aos requisitos de concretos autoadensáveis, conforme as normas brasileiras (ABNT, 2017) e as especificações da EFNARC (2005). Desta forma, foram produzidos os seguintes microconcretos:

MN = microconcreto contendo 100% de agregado natural, sem fibras;

MR = microconcreto contendo 100% de agregado reciclado, sem fibras;

MRF1 = microconcreto contendo 100% de agregado reciclado, reforçado com microfibras Astra 24/12; em um teor volumétrico de 2%;

MRF2 = microconcreto contendo 100% de agregado reciclado, reforçado com macrofibras Astra 50/25, em um teor volumétrico de 2%;

MRF12 = microconcreto contendo 100% de agregado reciclado, reforçado com microfibras Astra 24/12 e macrofibras Astra 50/25, em teor volumétrico de 2%, nas proporções de 1/3 e 2/3, respectivamente.

A Tabela 8 apresenta a composição das misturas dos microconcretos e o índice de reforço proporcionado, o qual foi calculado a partir Equação 1.

$$IR = V_f \cdot L_f / d_f \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

IR é o índice de reforço;

V_f é o teor volumétrico de fibras, expressa em porcentagem (%);

L_f é o comprimento da fibra, expressa em milímetros (mm);

d_f é o diâmetro da fibra, expressa em milímetros (mm).

Tabela 8 – Composição em kg/m³ e índice de reforço dos microconcretos

| Composição | Microconcreto | | | | |
|--|---------------|------|------|------|-------|
| | MN | MR | MRF1 | MRF2 | MRF12 |
| CP V-ARI (kg/m ³) | 1011 | 1011 | 1011 | 1011 | 1011 |
| Cinza volante (kg/m ³) | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 |
| Sílica da casca de arroz (kg/m ³) | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Agregado natural 150-300 µm (kg/m ³) | 87 | - | - | - | - |
| Agregado natural 425-600 µm (kg/m ³) | 850 | - | - | - | - |
| Agregado reciclado 150-300 µm (kg/m ³) | - | 74 | 52 | 52 | 52 |
| Agregado reciclado 425-600 µm (kg/m ³) | - | 694 | 672 | 672 | 672 |
| Superplastificante (kg/m ³) | 65 | 81 | 81 | 81 | 81 |
| Água* (kg/m ³) | 162 | 162 | 162 | 162 | 162 |
| Microfibra Astra 24/12 (kg/m ³) | - | - | 158 | - | 53 |
| Macrofibra Astra 50/25 (kg/m ³) | - | - | - | 158 | 105 |
| Índice de reforço | - | - | 48 | 100 | 82,58 |
| Relação água/cimento | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |

* Sem considerar a demanda adicional de água exigida pelo agregado reciclado (Abs = 4,75%).

Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 Produção dos microconcretos

Os microconcretos foram produzidos em um misturador turbilhonador MT120, do tipo planetário de eixo vertical, da marca Betomaq (Figura 17). O processo de mistura iniciou-se com a adição dos materiais secos, previamente selecionados e pesados, ao misturador. Logo após, realizou-se a homogeneização da mistura seca por 1 minuto. Com o equipamento em funcionamento, foram adicionados aproximadamente 80% da água e todo o superplastificante. O restante da água foi utilizado para a lavagem do recipiente contendo o aditivo e, em seguida, adicionado à mistura. Após 10 minutos de mistura, o misturador foi desligado por 30 segundos para a remoção do material aderido às paredes internas e ao fundo, visando melhorar a homogeneização da mistura. Posteriormente, o misturador foi ligado novamente, e o processo de mistura continuou até completar 25 minutos. Nos microconcretos com fibras de aço, foram incluídos mais dois minutos para a incorporação das fibras à mistura ainda em movimento, totalizando 27 minutos. Finalizado o processo, avaliaram-se as propriedades no

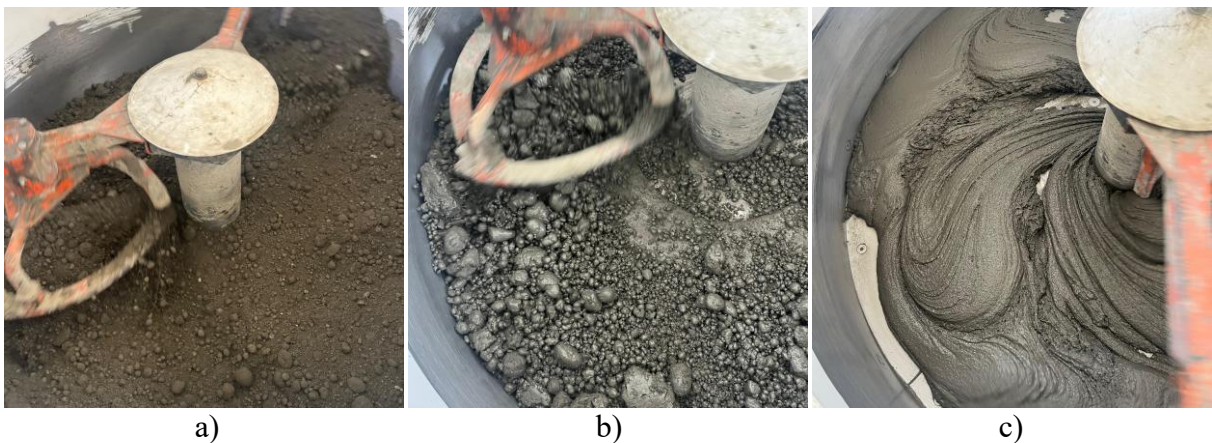
estado fresco do microconcreto e, posteriormente, realizou-se o lançamento nos moldes metálicos. Algumas etapas do processo de mistura do microconcreto MRF2 são mostradas na Figura 18.

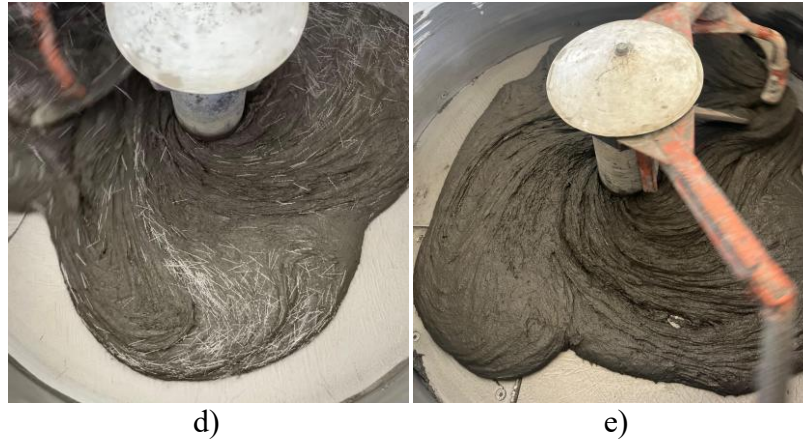
Figura 17 – Misturador turbilhonador MT120



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Etapas do processo de mistura do microconcreto MRF2: a) homogeneização dos materiais secos, b) microconcreto após 10 minutos de mistura c) microconcreto após 25 minutos de mistura e d) incorporação das macrofibras ASTRA 50/25 e) fim do processo de mistura.





Fonte: Elaboração própria.

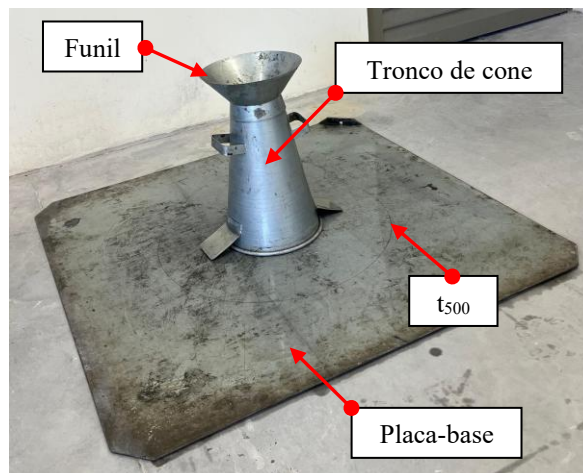
3.2.3 Avaliação das propriedades reológicas no estado fresco

Neste item, são descritos os procedimentos experimentais adotados para a avaliação das propriedades reológicas no estado fresco dos microconcretos, incluindo os ensaios de tronco de cone de Abrams, anel J, caixa L e funil V.

3.2.3.1 Tronco de cone de Abrams

O método do tronco de cone de Abrams (Figura 19), normatizado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017) é amplamente utilizado na avaliação da fluidez dos microconcretos em fluxo livre, sob a ação do seu próprio peso. O ensaio consistiu no posicionamento do tronco de cone sobre uma placa-base nivelada, seguido do preenchimento completo com a mistura, sem adensamento mecânico, e da remoção controlada do molde na direção vertical, permitindo o espalhamento do material. O espalhamento final (SF) foi determinado pela média de duas medições perpendiculares do diâmetro máximo alcançado. Além disso, foi registrado o tempo de escoamento (t_{500}) necessário para que o microconcreto atingisse o diâmetro de 500 mm. A análise dos resultados considera que um alto valor de espalhamento, associado a um tempo curto de escoamento, indicam maior fluidez e menor viscosidade da mistura.

Figura 19 – Configuração do ensaio do tronco de cone de Abrams, de acordo com a NBR15823-2 (ABNT, 2017)

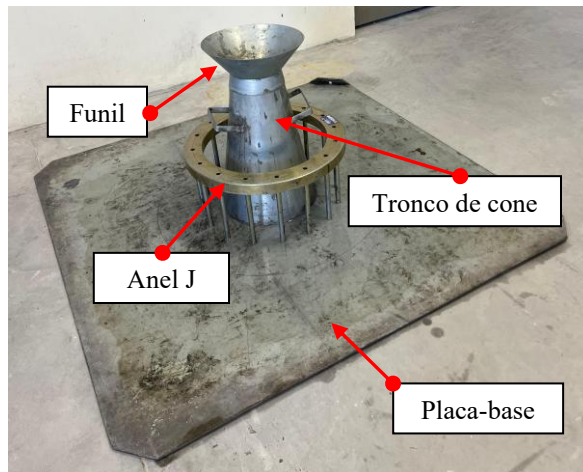


Fonte: Elaboração própria.

3.2.3.2 Anel J

De acordo com a NBR 15823-3 (ABNT, 2017), o método do anel J é utilizado para determinar a habilidade passante das misturas autoadensáveis reforçadas com macrofibras (MRF2 e MRF12), definidas como aquelas com comprimento superior a 15 mm, em função do maior potencial dessas fibras de interferirem na capacidade de escoamento da mistura ao atravessar obstáculos que simulam armaduras, sob condições de fluxo livre. A mistura foi despejada no tronco de cone, posicionado no centro do anel J metálico, constituído verticalmente por barras de aço de 16 mm de diâmetro, espaçadas a cada 59 mm, conforme mostra a Figura 20. Em seguida, o tronco de cone foi retirado pelas alças, permitindo o escoamento do material. A capacidade passante foi determinada pela diferença (PJ) entre o diâmetro médio do espalhamento (SF), obtido no ensaio descrito no item 3.2.3.1, e o diâmetro obtido neste ensaio (jF). Uma pequena diferença indica melhor habilidade de escoamento, sugerindo que o microconcreto pode fluir facilmente através de espaços confinados, como armaduras densas, sem segregação ou bloqueio.

Figura 20 – Configuração do ensaio do anel J, conforme a NBR 15823-3 (ABNT, 2017)

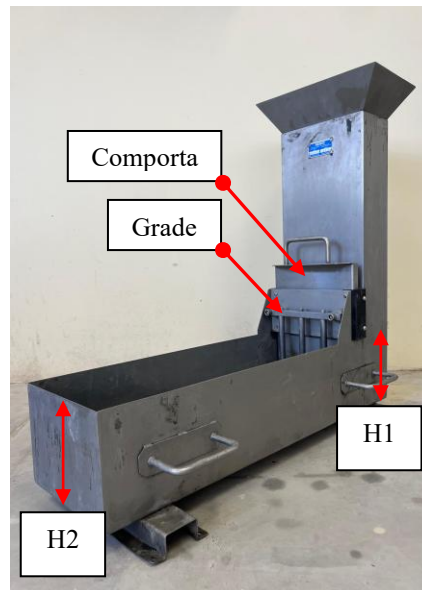


Fonte: Elaboração própria.

3.2.3.3 Caixa L

A habilidade passante dos microconcretos em condições de fluxo confinado foi avaliada pelo ensaio da caixa L, normatizado pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017). O ensaio foi realizado em uma caixa metálica de seção retangular em formato de L, constituída por uma seção vertical e outra horizontal, separadas por uma comporta. À frente da comporta, foram posicionadas três barras de aço lisas, com diâmetro de 12,50 mm, formando uma grade que restringe o fluxo do material após sua abertura. A mistura foi inicialmente colocada na seção vertical da caixa e, sob ação da gravidade, escoou para a seção horizontal. Após a estabilização do escoamento, foram medidas as alturas H_1 (seção inicial) e H_2 (seção final), conforme ilustrado na Figura 21. Uma razão H_2/H_1 igual a 1,00 indica elevada habilidade passante, característica de concretos autoadensáveis com comportamento autonivelante. Por outro lado, quando o material não apresenta mobilidade suficiente para escoar entre as barras e permanece retido na seção vertical, a razão H_2/H_1 tende a 0. Para que a mistura seja classificada como autoadensável, é necessário que apresente razão H_2/H_1 igual ou superior a 0,80. Esse parâmetro fornece uma estimativa do grau de dificuldade imposto à mistura ao escoar por áreas com restrições geométricas, sendo indicativo de sua capacidade de escoamento sem segregação ou bloqueio.

Figura 21 – Configuração do ensaio da Caixa L, segundo a norma NBR 15823-4 (ABNT, 2017)



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3.4 Funil V

A viscosidade e a capacidade de fluidez dos microconcretos foram determinadas pelo método do funil V (Figura 22), conforme a NBR 15823-5 (ABNT, 2017). O ensaio consistiu no preenchimento completo do funil, seguido da liberação da mistura pela abertura da comporta, enquanto um cronômetro registrava o tempo necessário para o escoamento total. Um tempo curto de escoamento indica menor viscosidade e maior fluidez, enquanto um tempo longo indica maior viscosidade e menor fluidez, evidenciando maior coesão ou tendência à segregação do microconcreto.

Figura 22 – Configuração do ensaio do Funil V, normatizado pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017)



Fonte: Elaboração própria.

3.2.4 Moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de prova

Após a realização dos ensaios reológicos dos microconcretos no estado fresco, iniciou-se a moldagem dos CPs destinados aos ensaios mecânicos dos microconcretos no estado endurecido. A moldagem foi realizada em uma única camada, aplicando-se golpes de martelo de borracha para regularização da superfície. Foram moldados cubos com dimensões de 100 x 100 x 100 mm para o ensaio de resistência à compressão axial e placas com dimensões de 400 x 100 x 12 mm (comprimento, largura e altura, respectivamente) para o ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos. Os moldes metálicos utilizados estão ilustrados na Figura 23 e, antes do lançamento dos microconcretos, foram revestidos internamente com óleo mineral. Previamente a moldagem das placas, foi determinada a densidade dos microconcretos conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13278 (ABNT, 2005). Esse procedimento foi fundamental para garantir que as placas apresentassem superfície uniforme e espessura constante.

Durante as primeiras 48 h, as amostras foram conservadas em ambiente de laboratório, com a superfície protegida por uma manta constantemente umedecida para evitar a perda de água por evaporação. Após esse período, foram desmoldados, identificados e mantidos em

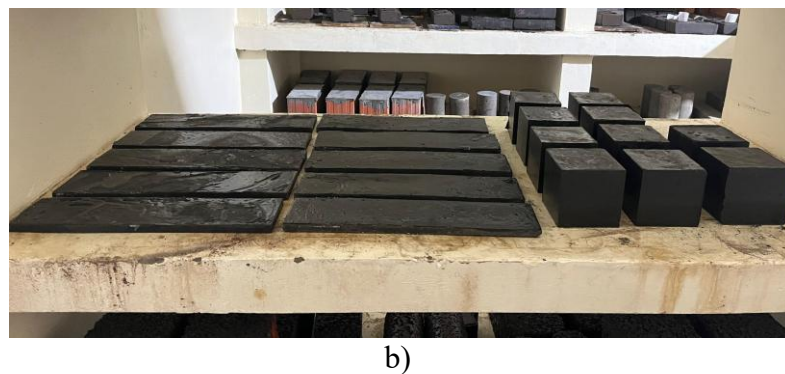
cura úmida em ambiente controlado, conforme a norma NBR 9479 (ABNT, 2006) até as idades dos ensaios mecânicos, conforme ilustra a Figura 24.

Figura 23 – Moldes metálicos: a) cúbico de 100 x 100 x 100 mm e b) prismático de 400 x 100 x 100 mm



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Corpos de prova: a) protegidos por uma manta umedecida e b) mantidos em cura úmida em ambiente controlado, de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006)



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 apresenta a data de produção dos microconcretos, incluindo informações sobre a temperatura e a umidade relativa do dia, além dos resultados de densidade e massa de cada placa produzida.

Tabela 9 – Data de produção dos microconcretos, temperatura, umidade relativa, densidade, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005) e massa de cada placa

| Microconcreto | Data de produção | T* (°C) | UR* (%) | Densidade (g/cm³) | Massa da placa (g) |
|----------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------|
| MN | 26/11/2024 | 26,1 | 73,0 | 2,34 | 1123,20 |
| MR | 14/10/2024 | 25,5 | 66,0 | 2,16 | 1036,80 |
| MRF1 | 13/05/2024 | 14,2 | 75,0 | 2,45 | 1176,00 |
| MRF2 | 30/01/2025 | 26,6 | 63,0 | 2,42 | 1161,60 |
| MRF12 | 31/03/2025 | 23,9 | 59,0 | 2,38 | 1142,40 |

* T = temperatura e UR = umidade relativa.

Fonte: Elaboração própria.

Foram moldados um total de 80 CPs, sendo oito amostras cúbicas e oito placas para cada microconcreto produzido, para serem ensaiados nas idades de 28 e 90 dias, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de amostras para cada um dos ensaios mecânicos aos 28 e 90 dias de idade

| Ensaio de resistência à | Microconcreto | | | | | Total |
|--|----------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| | MN | MR | MRF1 | MRF2 | MRF12 | |
| Compressão axial aos 28 dias | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |
| Compressão axial aos 90 dias | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |
| Tração na flexão a quatro pontos aos 28 dias | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |
| Tração na flexão a quatro pontos aos 90 dias | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |

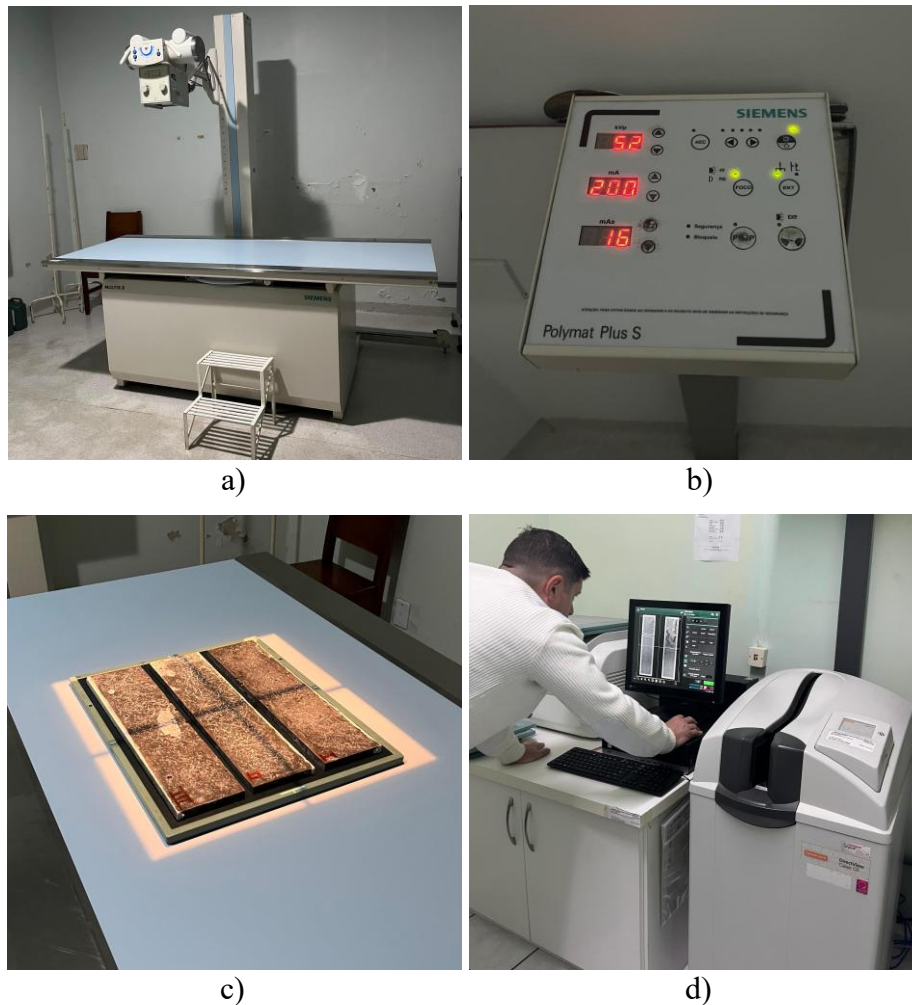
Fonte: Elaboração própria.

3.2.5 Imagens radiográficas

A distribuição das fibras de aço nas placas MRF1, MRF2 e MRF12 foi avaliada qualitativamente por meio da análise de imagens radiográficas, obtidas com o equipamento de

raio-x 500 mA, modelo Polymat Plus S, da marca Siemens. As etapas dos exames radiográficos nas placas com reforços fibrosos são mostradas na Figura 25.

Figura 25 – Etapas dos exames radiográficos: a) mesa de radiografia, b) painel de controle com os parâmetros de exposição utilizados (52 kVp, 200 mA e 16 mAs), c) realização do exame nas placas e d) tratamento da imagem radiográfica



Fonte: Elaboração própria.

3.2.6 Avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido

As propriedades mecânicas no estado endurecido dos microconcretos foram avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão a quatro pontos, conforme os procedimentos apresentados neste item. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente no software OriginLab 7, utilizando-se à análise de variância (ANOVA), seguido pelo teste de comparação múltipla de Tukey, a um nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$).

3.2.6.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em cubos de 100 x 100 x 100 mm, nas idades de 28 e 90 dias, com base na norma EN 12390-3 (CEN, 2019). Foi utilizada uma máquina de ensaios universais de sistema hidráulico estático, modelo SATEC™ 5590-HVL, da marca Instron, com capacidade de 1500 kN, adotando-se uma velocidade de deslocamento da mesa de 0,08 mm/min para todos os ensaios. A máquina possui um sistema integrado de aquisição de dados, que permite a leitura simultânea do carregamento aplicado, medida por célula de carga, e o deslocamento vertical da mesa, registrado por transdutores de deslocamento. Os dados foram coletados a uma frequência de 2 Hz e processados pelo software *Bluehill*. A resistência à compressão axial foi determinada pela Equação 2.

$$\sigma_c = F / A \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

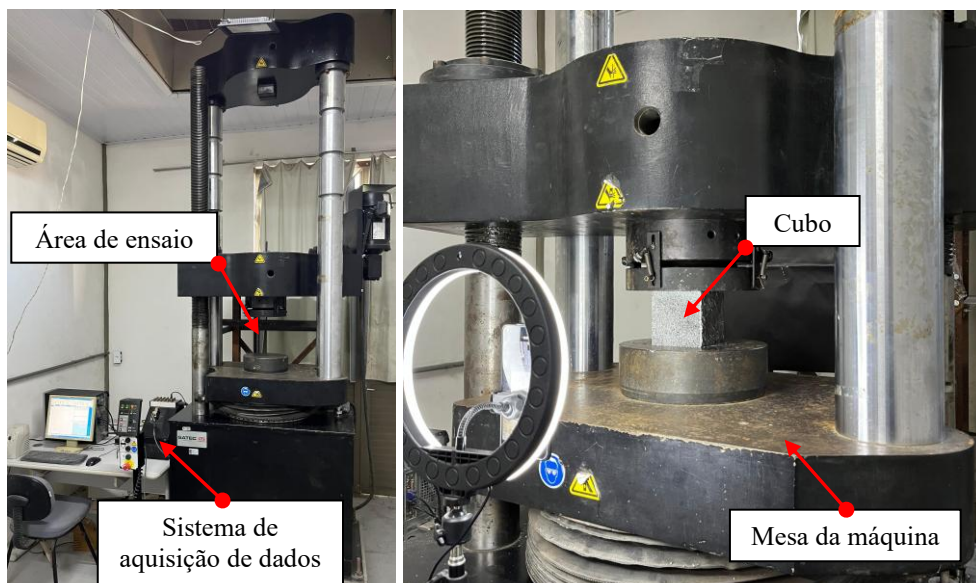
σ_c é a resistência à compressão axial, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

A é a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em milímetros quadrado (mm²).

A configuração dos ensaios de resistência à compressão axial pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à compressão axial: a) máquina de ensaios universais Instron e b) realização do ensaio no cubo



Fonte: Elaboração própria.

3.2.6.2 Resistência à tração na flexão a quatro pontos

A resistência à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos na norma NBR 12142 (ABNT, 2010), utilizando placas de 400 x 100 x 12 mm, ensaiadas aos 28 e 90 dias de idade. Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universais, modelo DL 20000, da marca EMIC, com capacidade de 200 kN. A velocidade de deslocamento do travessão da máquina foi definida em 0,10 mm/min, com vão livre de 300 mm. O ensaio foi interrompido ao atingir deslocamento vertical de 4 mm, critério adotado para todas as amostras. A medição do deslocamento durante os ensaios foi realizada por meio de dois sensores Linear Variable Differential Transformer (LVDT), posicionados no centro do vão livre, conforme a Figura 27. Para assegurar o posicionamento correto dos sensores, foi colada uma chapa de aço na face superior da placa, utilizada como referência para a medição do deslocamento. Os LVDT's, da marca HBM, possuem curso de ± 10 mm e precisão de 0,001 mm. A aquisição de dados foi realizada pelo software *Catman Easy*, conectado ao equipamento Spider8, também da marca HBM, com frequência de aquisição de 2 Hz. A resistência à tração na flexão a quatro pontos foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$f_{ct,f} = F \cdot \ell / b \cdot d^2 \quad \text{Eq. 3}$$

Nos casos em que a ruptura ocorresse fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de ℓ , utilizou-se a Equação 4 para determinar a resistência à tração na flexão a quatro pontos.

$$f_{ct,f} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d^2 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão a quatro pontos, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

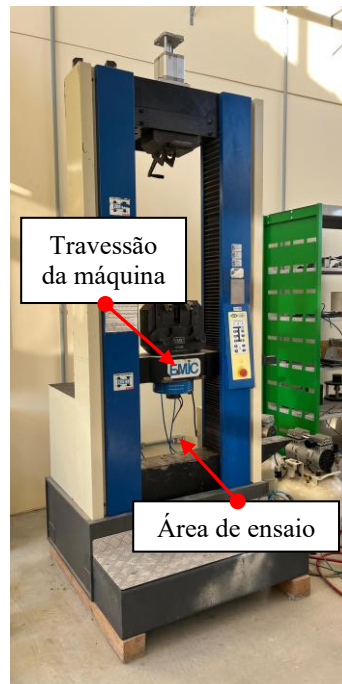
ℓ é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

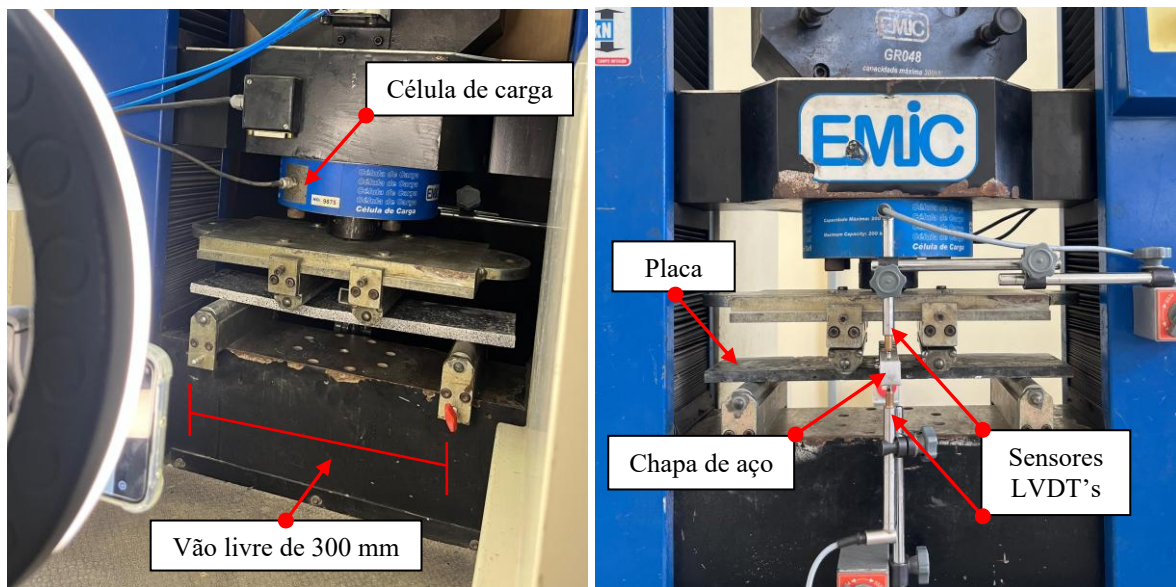
d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

a é a distância entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

Figura 27 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos: a) máquina de ensaios universais EMIC, b) vista frontal do ensaio e c) vista posterior do ensaio



a)



b)

c)

Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios reológicos no estado fresco e mecânicos e, de exames radiográficos realizados nos microconcretos. As propriedades reológicas no estado fresco foram determinadas por meio do espalhamento e tempo de escoamento (t_{500}) do tronco de cone de Abrams, habilidade passante no anel J e na caixa L e fluidez no funil V. As propriedades mecânicas no estado endurecido foram avaliadas pelas resistências à compressão axial e à tração na flexão a quatro pontos, nas idades de 28 e 90 dias. Além disso, foi analisada a distribuição das fibras de aço nas placas através de imagens radiográficas.

4.1 Avaliação das propriedades reológicas no estado fresco

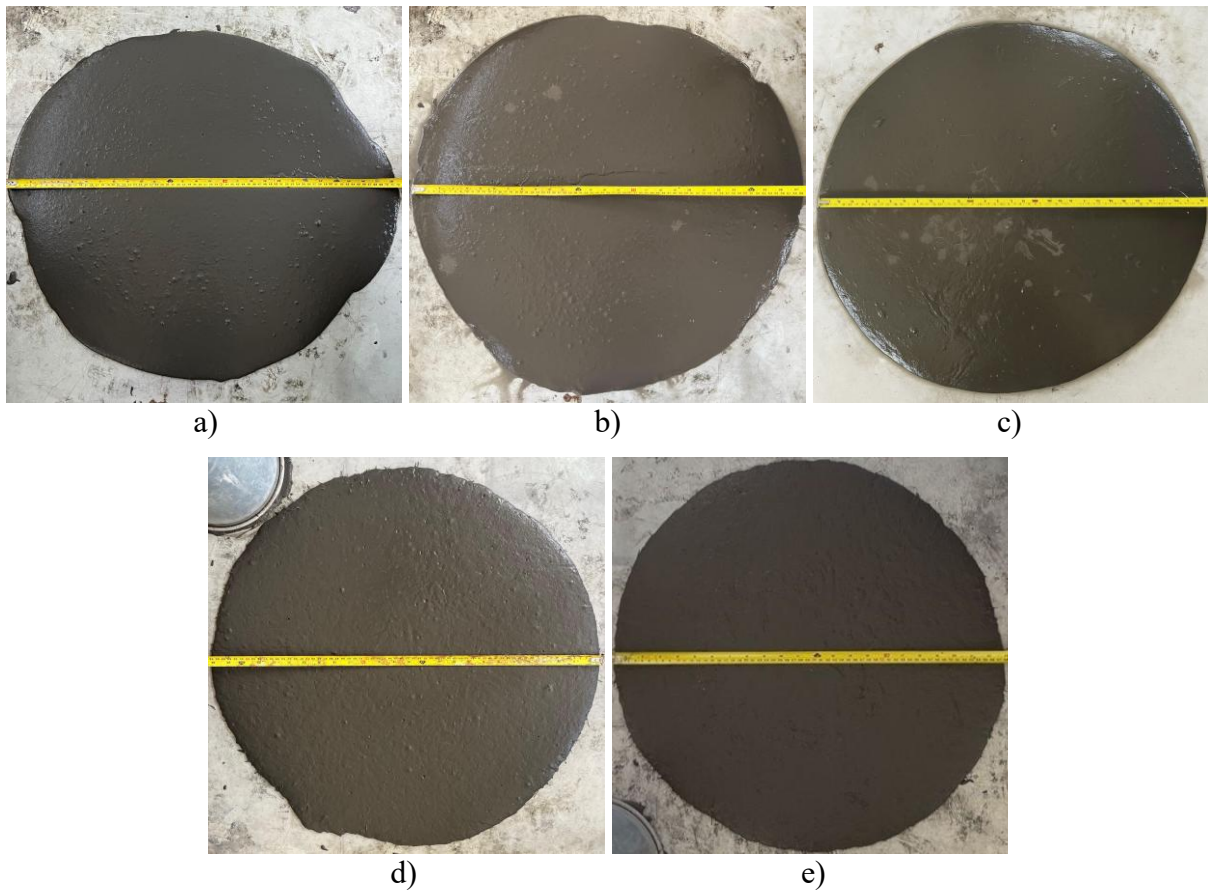
A Tabela 11 apresenta os resultados de espalhamento e t_{500} do tronco de cone, habilidade passante no anel J e na caixa L e fluidez no funil V. A Figura 26 mostra a configuração final do ensaio de espalhamento de todos os microconcretos produzidos.

Tabela 11 – Resultados das propriedades reológicas no estado fresco dos microconcretos, conforme as normas NBR 15823-2, NBR 15823-3, NBR 15823-4 e NBR 15823-5 (ABNT, 2017)

| Microconcreto | Ensaio reológico | | | | |
|---------------|-------------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|
| | Tronco de cone | | Anel J (mm) | Caixa L (H2/H1) | Funil V (s) |
| | Espalhamento (mm) | t_{500} (s) | | | |
| MN | 671 | 10 | - | 1,00 | 50 |
| MR | 711 | 9 | - | 1,00 | 43 |
| MRF1 | 667 | 10 | - | 0,96 | 40 |
| MRF2 | 650 | 11 | 79 | 0,52 | 63 |
| MRF12 | 560 | 20 | 95 | 0,28 | 84 |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Configuração final do ensaio de espalhamento nos microconcretos, de acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2017): a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a NBR 15823-2 (ABNT, 2017), todos os microconcretos produzidos apresentaram índice de estabilidade visual (IEV) igual a 0, indicando elevada estabilidade, sem evidências de segregação ou exsudação, conforme ilustrado na Figura 26. Nota-se, ainda na referida figura, uma distribuição homogênea dos agregados ao longo do diâmetro de espalhamento, desde o centro até as bordas, indicando adequada retenção de água e coesividade das misturas. Além disso, observa-se que os microconcretos sem fibras (Figura 26 a) e b)) apresentaram diâmetros de espalhamento mais assimétricos e bordas menos definidas, características possivelmente influenciadas por fatores experimentais, como desnível ou presença de água residual na placa-base, ou ainda dificuldades na retirada vertical do tronco de cone. Por outro lado, as misturas com adição de fibras de aço (Figura 26 c), d) e e)) exibiram espalhamentos mais circulares e bordas bem definidas, o que evidencia o efeito das fibras de aço no aumento da viscosidade e coesão da matriz, favorecendo um escoamento mais controlado e simétrico. Também se verificou uma boa distribuição das fibras ao longo do espalhamento, desde o centro até as extremidades.

Os resultados apresentados na Tabela 11 indicam que a utilização de agregado natural de rio, bem como a substituição total de agregado natural por agregado reciclado de RCC, sem e com adição de fibras de aço, permitiu a produção de microconcretos com propriedades reológicas no estado fresco compatíveis com os critérios estabelecidos pelas normas brasileiras e pelas especificações da organização europeia EFNARC (2005) para concretos autoadensáveis.

No ensaio de espalhamento do tronco de cone, os microconcretos apresentaram valores variando entre 560 mm a 711 mm. De acordo com a classificação da NBR 15823-2 (ABNT, 2017) e da EFNARC (2005), todos os microconcretos atenderam ao valor mínimo de 550 mm para o espalhamento do tronco de cone, sendo classificados entre as classes SF1 (550-650 mm) e SF2 (660-750 mm). Os microconcretos MN (671 mm), MR (711 mm) e MRF1 (667 mm) enquadraram-se na classe SF2, adequada para aplicações usuais com armaduras de densidade moderada, enquanto, os microconcretos MRF2 (650 mm) e MRF12 (560 mm) foram classificados na classe SF1, recomendada para elementos com geometrias simples ou com baixa taxa de armaduras. O microconcreto MR apresentou maior espalhamento do que o MN, indicando que a correção na dosagem de superplastificante e água foi eficiente para compensar os efeitos negativos do agregado reciclado de RCC, como à maior absorção de água, além das superfícies mais rugosas e irregulares, conforme observado na imagem do agregado obtida por MEV (ver item 3.1.1). A incorporação de fibras de aço, no entanto, diminuiu a fluidez dos microconcretos MRF1, MRF2 e MRF12, com reduções de 6,18%, 8,58% e 21,25%, respectivamente, em comparação ao microconcreto MR. Essa diminuição no espalhamento pode estar associada às características das fibras, como o número de fibras/m³, comprimento e relação aspecto, que aumentam a tensão de escoamento e a viscosidade plástica das misturas. Em comparação com o MRF1, os microconcretos MRF2 e MRF12 apresentaram reduções no espalhamento de 2,55% e 16,05%, respectivamente. Esses resultados indicam que a utilização de macrofibras e, principalmente, a combinação de micro e macrofibras, intensificou o efeito de restrição ao espalhamento das misturas, aumentando a resistência interna e reduzindo a fluidez. Os tempos de escoamento (t_{500}) dos microconcretos ficaram entre de 9 s e 20 s, estando todos acima da faixa recomendada de 2 s a 5 s. Isso indica que todas as misturas apresentaram viscosidade elevada, mesmo aquelas sem incorporação de fibras de aço. O menor tempo foi registrado para o microconcreto MR (9s), seguido por MN e MRF1 (10s), MRF2 (11 s) e MRF12 (20 s). Os tempos mais longos nas misturas com fibras sugerem que os reforços fibrosos aumentaram a resistência interna ao início do escoamento, efeito que foi amplificado quando realizado a hibridização das fibras.

O ensaio do anel J, utilizado para avaliar a habilidade passante dos microconcretos reforçados com macrofibras na presença de armaduras, indicou que as misturas MRF2 e MRF12 apresentaram diferenças de espalhamento (PJ) de 79 mm e 95 mm, respectivamente, em relação ao ensaio de espalhamento livre. Esses resultados demonstram que a incorporação de macrofibras aumentou a restrição ao fluxo entre as armaduras, sendo esse efeito mais acentuado na mistura com fibras híbridas (MRF12). Dessa forma, a menor perda de espalhamento observada na mistura MRF2 indica uma maior habilidade passante, resultando em menor interferência das fibras no escoamento do microconcreto.

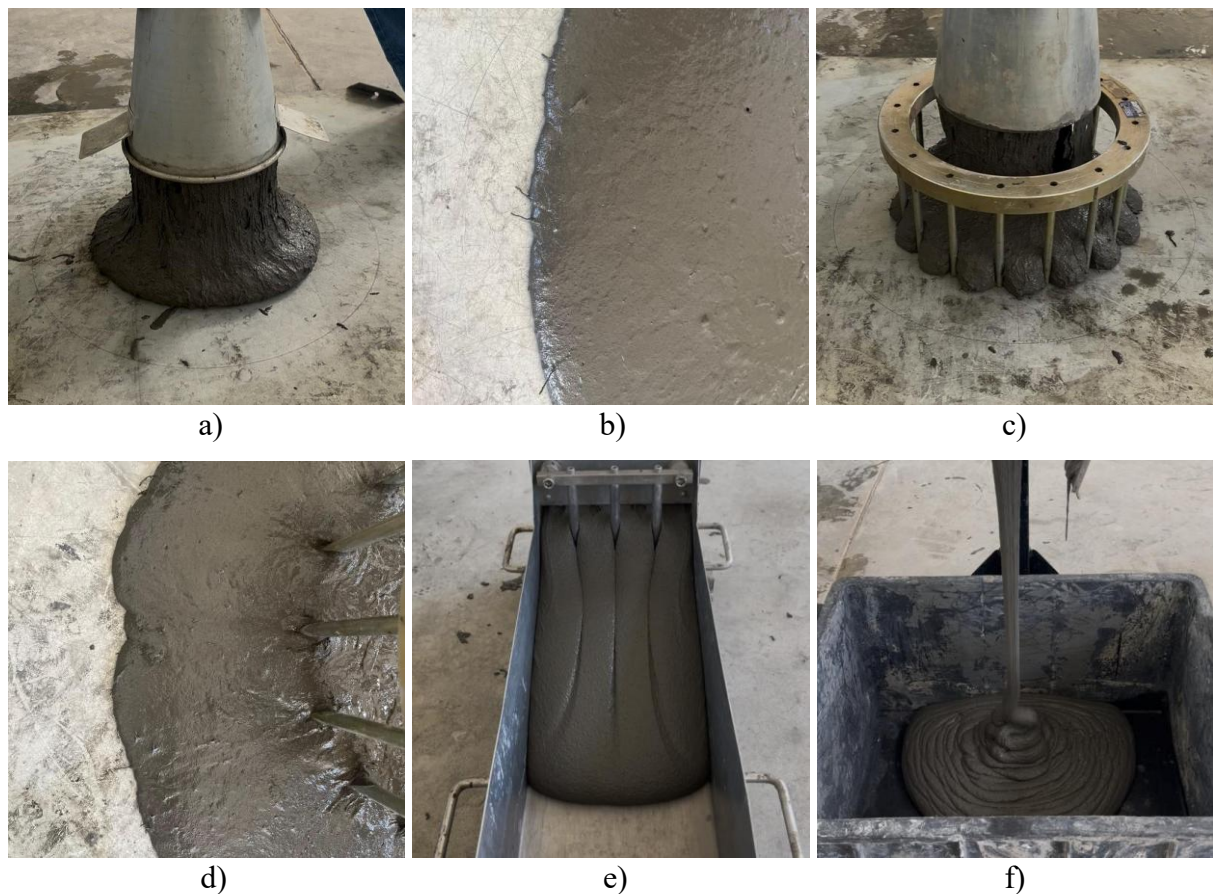
No ensaio da caixa L, os resultados da razão H2/H1 variaram de 0,28 a 1,00. Os microconcretos MN, MR e MRF1 apresentaram valores superiores a 0,80, atendendo, portanto, ao critério mínimo da NBR 15823-4 (ABNT, 2017) e da EFNARC (2005) para uma boa habilidade passante na presença de armaduras. Por outro lado, os microconcretos MRF2 (0,52) e MRF12 (0,28) não atenderam a esse critério, evidenciando uma redução da habilidade passante entre as barras de anteparo. Embora a mistura MRF2 contenha aproximadamente 4030580 macrofibras/m³, número inferior à quantidade de microfibras em MRF1 (≈ 9028594 fibras/m³), o maior comprimento das macrofibras ocasionou maior restrição ao fluxo. Na mistura híbrida (MRF12), com cerca de 5707023 fibras/m³, a combinação de micro e macrofibras resultou em maiores pontos de interferência, intensificando o entrelaçamento interno e o travamento da mistura fresca, o que justifica o menor valor de H2/H1 entre todas as misturas. Esses resultados indicam que, além da quantidade de fibras/m³, suas características geométricas e o modo de interação entre os diferentes tipos de fibras têm influência determinante sobre a habilidade passante do microconcreto.

Os tempos de escoamento dos microconcretos, obtidos no ensaio do funil V, variaram entre 40 s e 84 s, situando-se acima da faixa recomendada de 6 s a 12 s, conforme estabelecido pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017) e pela EFNARC (2005). Para os microconcretos sem fibras, o MR (43 s) apresentou maior fluidez em comparação ao MN (50 s), sugerindo que a correção na dosagem de superplastificante e água no MR contribuiu para melhorar a fluidez, compensando as características física e morfológica do agregado reciclado. Em relação aos microconcretos reforçados com fibras de aço, o MRF1 (40 s) apresentou o menor tempo de escoamento, sendo a mistura mais fluida entre todas as composições analisadas, indicando que a adição de microfibras não teve influência na viscosidade do material. Enquanto, os microconcretos MRF2 (63 s) e MRF12 (84 s) demonstraram tempos de escoamento progressivamente mais elevados, o que reflete o

impacto das macrofibras na viscosidade das misturas. O aumento no tempo de escoamento, de MRF1 para MRF12, evidencia que a característica geométrica de comprimento das fibras, como anteriormente mencionada, foram fatores determinantes para o incremento da resistência ao fluxo.

A Figura 28 mostra a execução dos ensaios reológicos no estado fresco realizados no microconcreto MRF2, incluindo os procedimentos correspondentes aos ensaios com o tronco de cone de Abrams, anel J, caixa L e funil V.

Figura 28 – Imagens obtidas durante a realização dos ensaios reológicos no microconcreto MRF2: a) e b) tronco de cone de Abrams, c) e d) anel J, e) caixa L e f) funil V, conforme as normas NBR 15823-2, NBR 15823-3, NBR 15823-4 e NBR 15823-5 (ABNT, 2017)



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 28, é possível observar o comportamento do microconcreto MRF2 durante os ensaios reológicos no estado fresco. A Figura 28 a), b), c) e d) permite visualizar o início do espalhamento, com e sem a presença de armaduras, bem como as bordas formadas durante os ensaios, que refletem a fluidez e a habilidade passante da mistura, respectivamente. Também é possível verificar o escoamento na caixa L (Figura 28 e)), o qual indica a habilidade passante

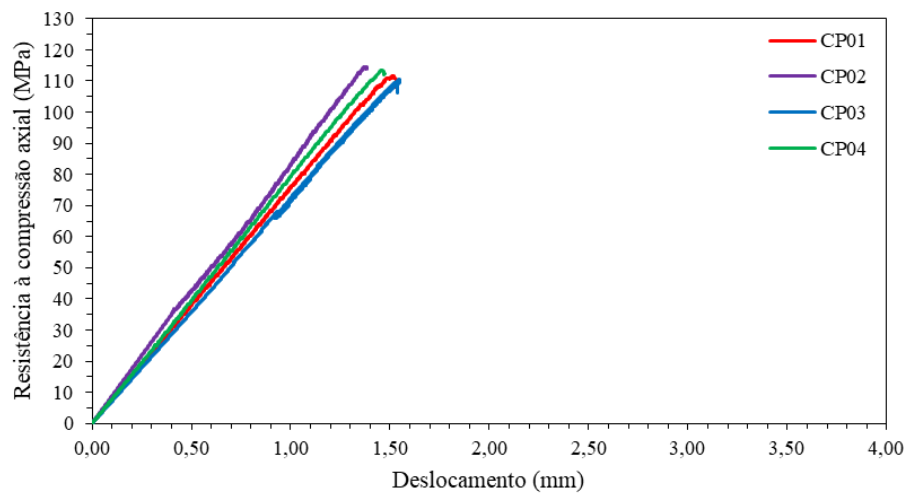
entre as barras de anteparo, além da fluidez observada no funil V (Figura 28 f)), relacionada à viscosidade do material. De modo geral, a Figura 28 fornece suporte visual para análise qualitativa dos efeitos da presença de macrofibras sobre o desempenho reológico do microconcreto, permitindo uma correlação direta com os resultados apresentados anteriormente.

4.2 Avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido

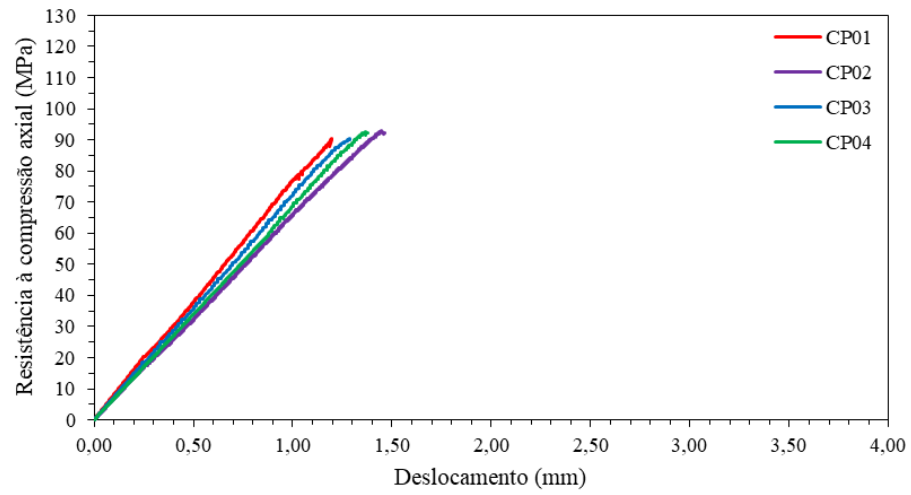
4.2.1 Comportamento à compressão axial dos microconcretos

Os comportamentos mecânicos das amostras cúbicas dos microconcretos MN, MR, MRF1, MRF2 e MRF12, obtidos através dos ensaios de compressão axial realizados nas idades de 28 e 90 dias, são mostrados nas Figura 29 e 30, respectivamente.

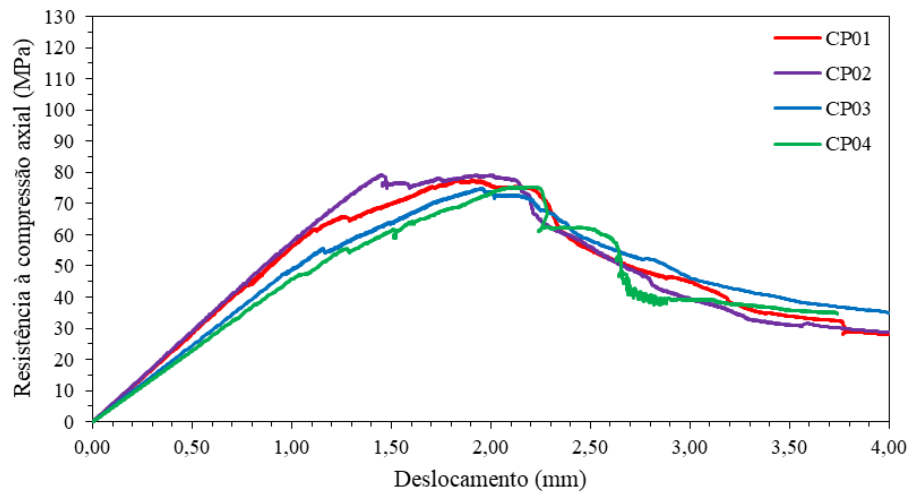
Figura 29 – Curvas de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 28 dias: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12



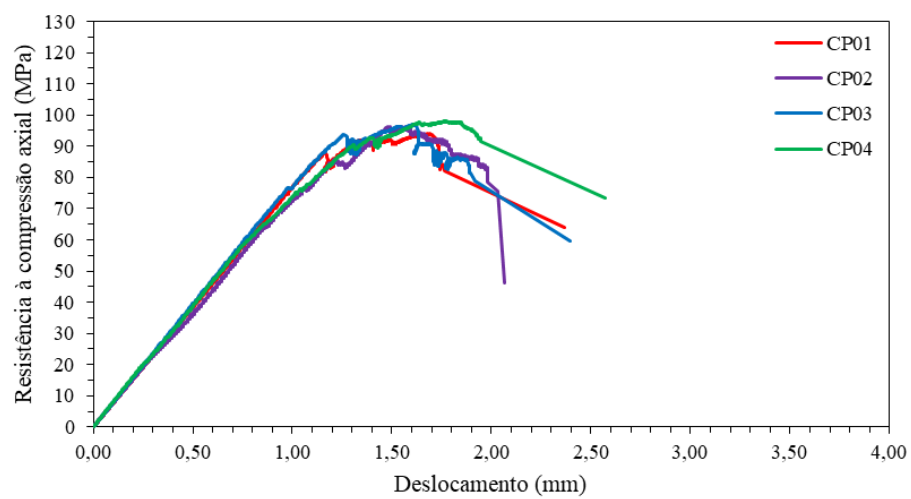
a) MN



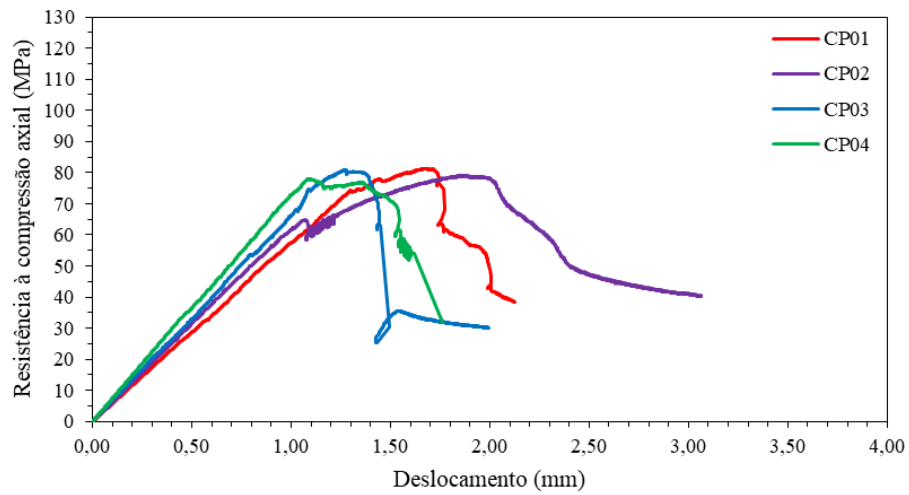
b) MR



c) MRF1



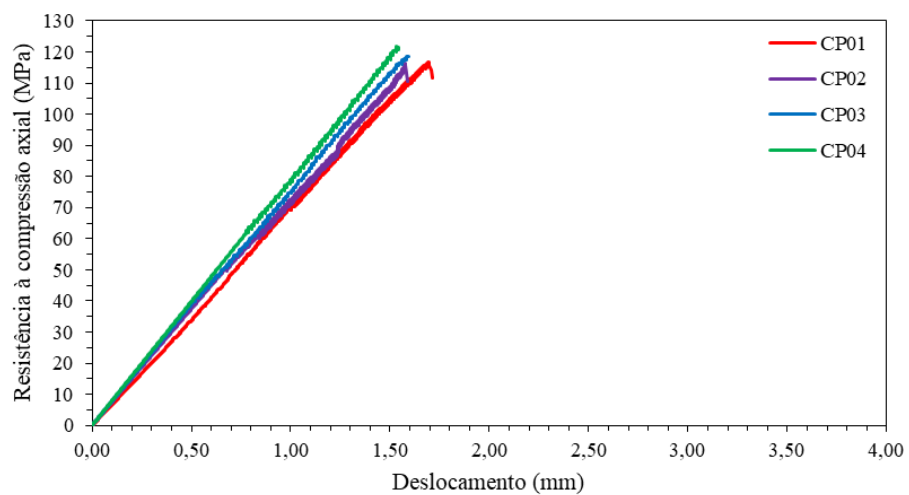
d) MRF2



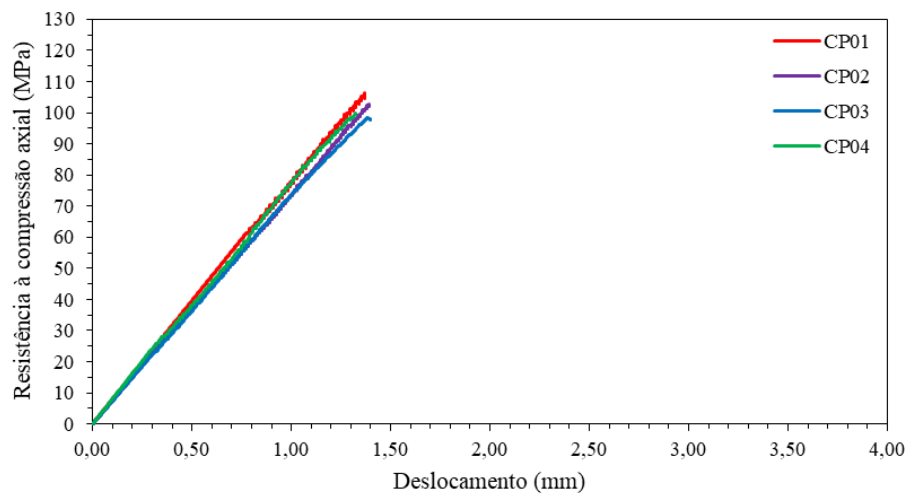
e) MRF12

Fonte: Elaboração própria.

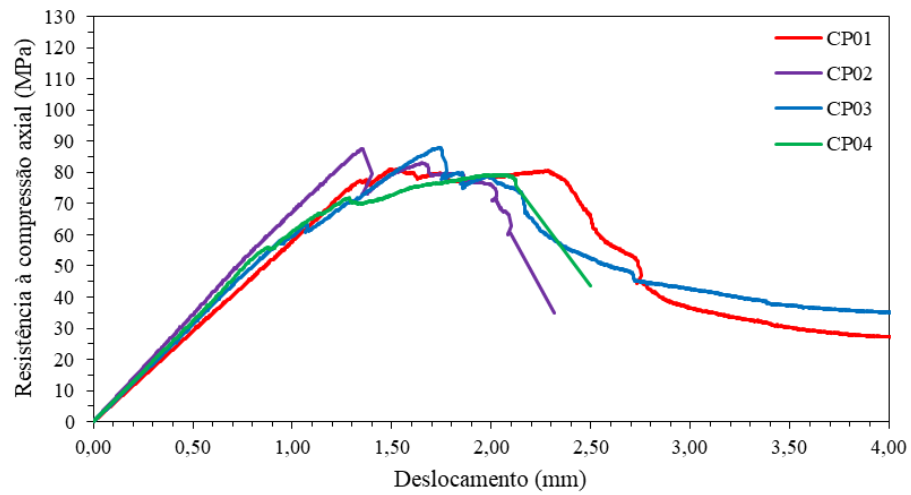
Figura 30 – Comportamentos de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 90 dias: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12



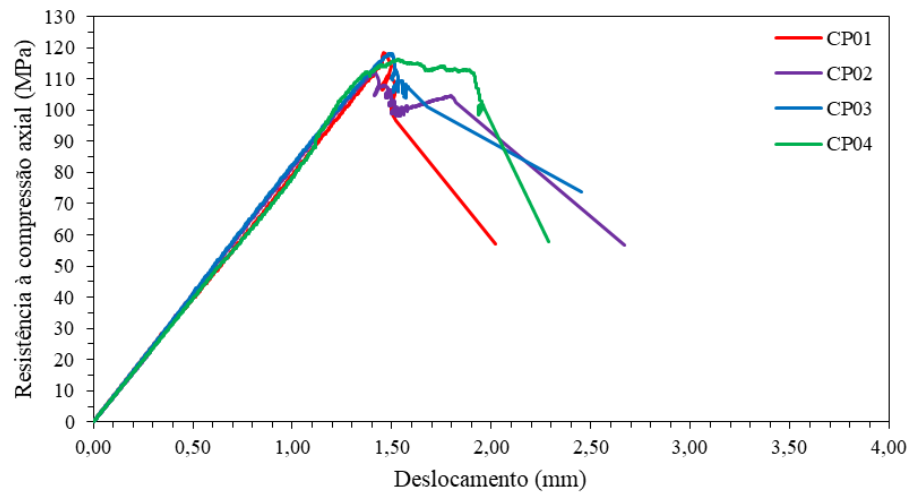
a) MN



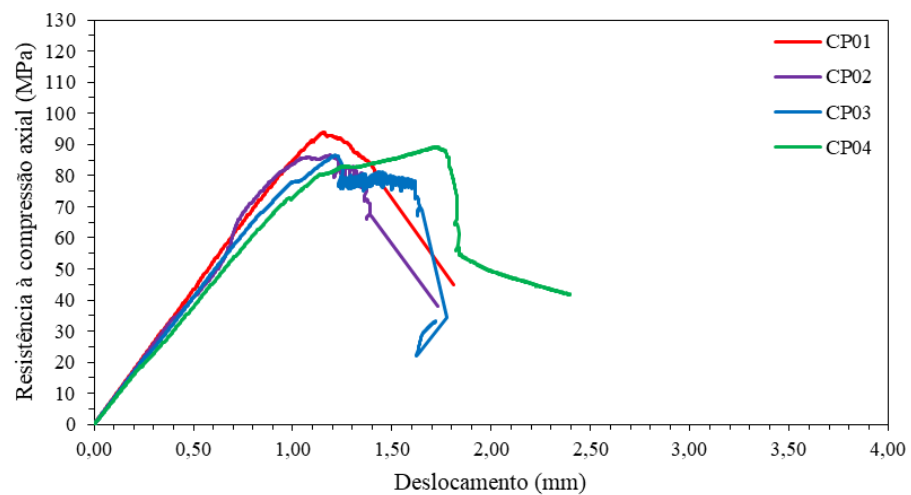
b) MR



c) MRF1



d) MRF2



e) MRF12

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 12 apresenta os resultados de resistência à compressão axial e o deslocamento (média, desvio padrão e coeficiente de variação), dos microconcretos avaliados

nas idades de 28 e 90 dias. A Figura 31 mostra as curvas típicas dos microconcretos MN, MR, MRF1, MRF2 e MRF12, obtidas por meio dos ensaios de compressão axial realizados nas mesmas idades.

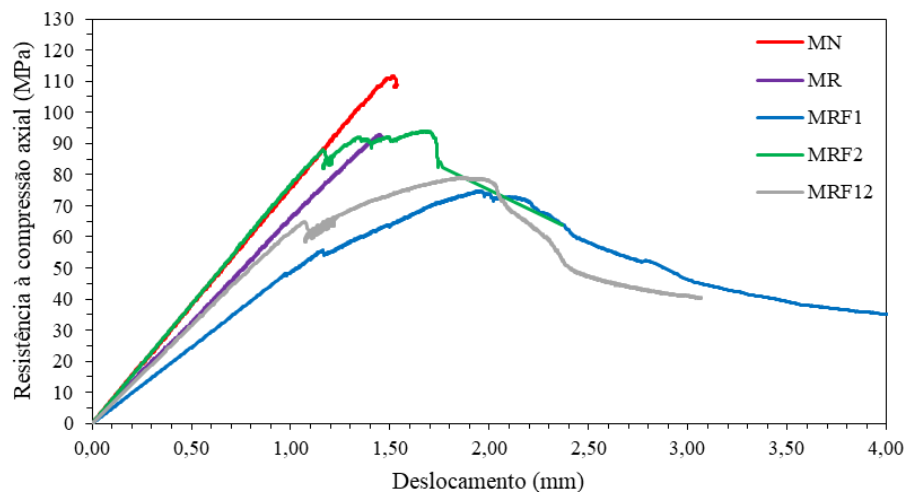
Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão axial e deslocamento de pico (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos microconcretos aos 28 e 90 dias, de acordo com a EN 12390-3 (CEN, 2019)

| Característica | Idade de cura | Microconcreto | | | | |
|---------------------------------|---------------|---------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | | MN | MR | MRF1 | MRF2 | MRF12 |
| Tensão média (MPa) | 28 | 112,56 | 91,54 | 76,82 | 96,36 | 79,81 |
| | 90 | 118,38 | 101,86 | 84,00 | 116,09 | 89,00 |
| DV*/CV* (MPa/%) | 28 | 1,84/1,63 | 1,27/1,39 | 2,12/2,76 | 1,75/1,81 | 1,55/1,94 |
| | 90 | 2,46/2,07 | 3,55/3,48 | 4,47/5,32 | 2,92/2,52 | 3,43/3,85 |
| Deslocamento médio de pico (mm) | 28 | 1,47 | 1,32 | 1,83 | 1,64 | 1,47 |
| | 90 | 1,60 | 1,37 | 1,66 | 1,48 | 1,32 |
| DV*/CV* (mm/%) | 28 | 0,08/5,14 | 0,11/8,12 | 0,28/15,18 | 0,12/7,28 | 0,35/23,86 |
| | 90 | 0,07/4,35 | 0,03/2,25 | 0,31/18,44 | 0,05/3,44 | 0,27/20,56 |

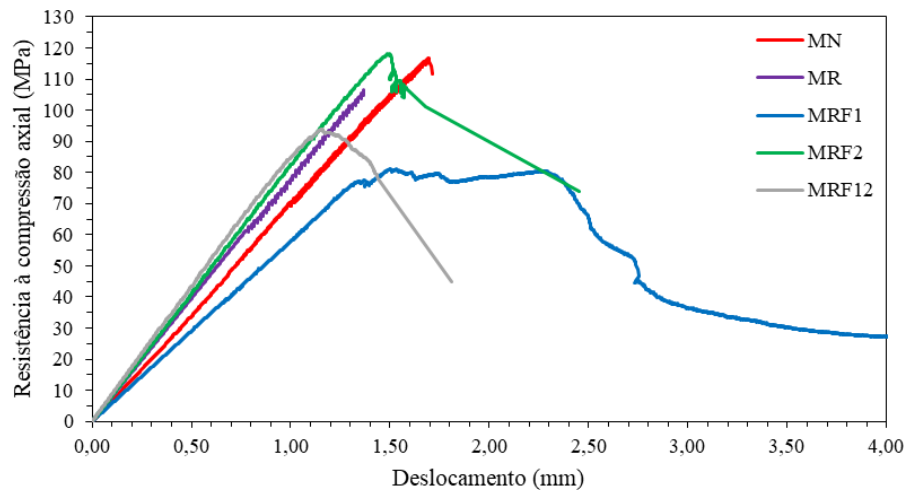
* DV = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Curvas típicas de resistência à compressão axial (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos: a) aos 28 dias e b) aos 90 dias



a) Aos 28 dias



b) Aos 90 dias

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as curvas típicas de resistência à compressão axial x deslocamento, apresentadas na Figura 31 a) e b) para as idades de 28 e 90 dias, respectivamente, é possível observar diferenças significativas no comportamento mecânico dos microconcretos em função do tipo de agregado utilizado e da incorporação de fibras de aço. Verifica-se, ainda, que o tempo de cura influenciou não apenas a rigidez na fase elástica, mas também a tensão máxima de resistência e a tenacidade na fase pós-pico, com efeitos mais evidentes nas misturas reforçadas com fibras de aço. Ao analisar a fase elástica das curvas, nota-se que a mistura MRF1 apresentou a menor rigidez em ambas as idades, o que se reflete na menor inclinação da fase ascendente das curvas. Em contrapartida, as misturas com macrofibras (MRF2 e MRF12) mantiveram rigidez inicial próxima à observada nas misturas sem fibras (MN e MR), indicando que a substituição total do agregado natural por agregado reciclado, a incorporação de macrofibras às misturas, bem como o tempo de cura, não comprometeu significativamente a rigidez dos microconcretos. Esse parâmetro é fundamental para o desempenho em serviço das estruturas, uma vez que deformações excessivas podem prejudicar o atendimento ao estado limite de serviço (ELS), conforme estabelecido NBR 6118 (ABNT, 2023).

Em relação à resistência máxima, observa-se que a mistura MN, apresentou os maiores valores em ambas as idades, evidenciando desempenho superior em termos de capacidade resistente. A mistura MR também demonstrou incremento na resistência aos 90 dias, em relação aos 28 dias, embora com valores inferiores às misturas MN e MRF2. As misturas MRF1 e MRF12 apresentaram tensões médias equivalentes entre si, tanto aos 28 dias quanto aos 90 dias, enquanto a mistura MRF2 atingiu valores de resistência próximos aos da mistura MN, principalmente aos 90 dias de idade.

O comportamento pós-pico variou significativamente entre as misturas. As misturas sem fibras de aço (MN e MR) apresentaram ruptura abrupta e baixa capacidade de deformação após o pico, evidenciando comportamento frágil e baixa tenacidade. Por outro lado, as misturas reforçadas com fibras de aço demonstraram maior ductilidade e capacidade de absorção de energia. A mistura MRF1 destacou-se pelo elevado patamar de tensão residual após o pico, resultado da atuação das microfibras no controle da propagação de fissuras. As misturas MRF2 e MRF12 apresentaram comportamento intermediário, com leve aumento de deformação após o pico, mas redução da tenacidade aos 90 dias, sugerindo que o tempo de cura influenciou o desempenho pós-pico dessas composições.

Os coeficientes de variação da tensão média, apresentados na Tabela 12, foram considerados baixos (inferiores a 5,50%), o que indica consistência nos ensaios mecânicos realizados. De acordo com a mesma tabela, o microconcreto MN apresentou resistência à compressão de 112,56 MPa aos 28 dias, valor 44,47% inferior ao do concreto desenvolvido por Formagini (2005), que atingiu 162,10 MPa em CPs cilíndricos aos 28 dias, multiplicado por um fator empírico de 1,25 para equivaler à resistência de CPs cilíndricos à de cubos (Mehta & Monteiro, 2014). Este comportamento, pode ser atribuído às substituições do cimento CP III-40 pelo CP V-ARI, da sílica ativa e da sílica flour #425 pela SCA, da fibra de wollastonita pela cinza volante, além da remoção total das fibras de aço com l/d de 67 em um teor volumétrico de 2%.

Aos 28 dias, observa-se que a tensão média da mistura MR (91,54 MPa) foi aproximadamente 18,70% inferior à tensão da mistura MN (112,56 MPa). Aos 90 dias, essa diferença diminuiu para 13,92%, com a MR atingindo 101,86 MPa em relação aos 118,38 MPa da MN. Em ambas as idades, os resultados apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as misturas. A menor resistência observada na MR pode estar relacionada às características intrínsecas do agregado reciclado de RCC, bem como à maior demanda por superplastificante e água, fatores que contribuem para formação de zonas de transição mais porosas e, conseqüentemente, mais frágeis na matriz cimentícia.

Na comparação entre o microconcreto com agregado reciclado e os microconcretos com agregado reciclado reforçados com micro e macrofibras, é possível observar que as tensões médias à compressão variaram em função do tipo e da combinação de fibras utilizadas. Aos 28 dias, a tensão média do microconcreto MR foi de 91,54 MPa, enquanto os microconcretos MRF1 (76,82 MPa) e MRF12 (79,81 MPa) apresentaram valores 16,06% e 12,80% inferiores, respectivamente. No entanto, o MRF2 (96,36 MPa) obteve desempenho superior, com resistência 5,27% maior em comparação ao MR. Aos 90 dias de idade, essa

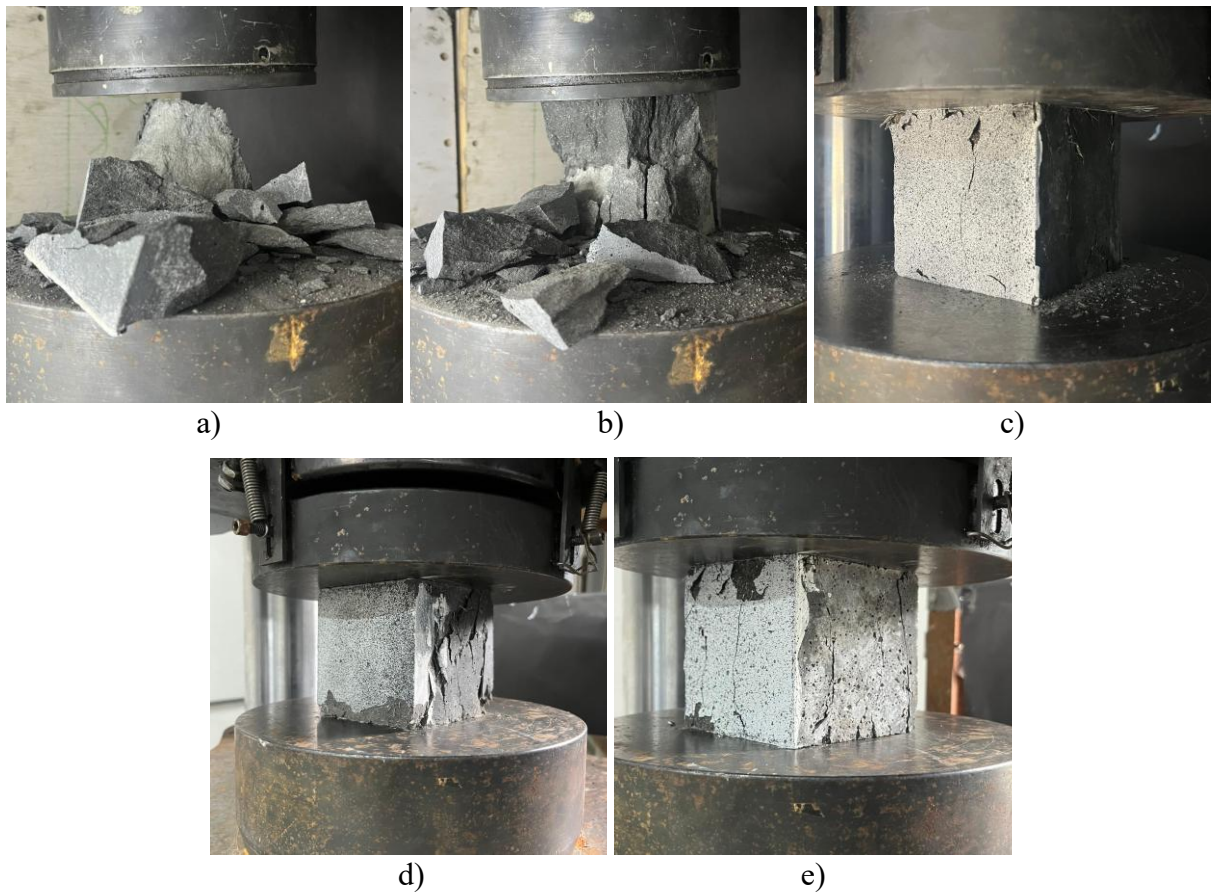
tendência foi mantida, com os microconcretos MRF1, MRF2 e MRF12 apresentando tensões médias à compressão axial de 84,00 MPa, 116,09 MPa e 89,00 MPa, respectivamente, em relação ao microconcreto MR (101,86 MPa). Não houve diferença estatisticamente significativa entre os microconcretos MR e MRF2 aos 28 dias, assim como entre os MRF1 e MRF12 nas idades de 28 e 90 dias, e também entre os MN e MRF2 aos 90 dias. Esses resultados evidenciam que apenas o microconcreto reforçado com macrofibras foi capaz de promover um acréscimo efetivo na resistência à compressão, o que pode ser atribuído ao IR de 100 proporcionado à matriz. Além disso, observou-se que, apesar dos microconcretos MRF1 e MRF12 apresentarem maior quantidade de fibras/m³ em comparação ao MRF2, não houve ganhos significativos de resistência.

Em relação à idade de cura, observa-se que todos os microconcretos apresentaram incremento na resistência à compressão axial entre 28 e 90 dias, com variações estatisticamente significativas, exceto para o microconcreto com agregado natural de rio (MN). Tal comportamento pode estar relacionado ao processo contínuo de hidratação do cimento, potencializado pela composição e a água reservada no agregado reciclado de RCC, conforme indicado na análise de FRX (ver item 3.1.1). Esses compostos apresentam potencial pozolânico e podem reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) liberado durante a hidratação do cimento, contribuindo para a formação de produtos secundários, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa reação secundária pode ter favorecido a densificação microestrutural da matriz ao longo do tempo de cura, justificando os ganhos de desempenho observados.

O aumento da resistência foi de 5,17% para o microconcreto com agregado natural de rio (MN), 11,27% para o microconcreto com agregado reciclado de RCC sem fibras (MR), 9,36% para o microconcreto com agregado reciclado reforçado com microfibras (MRF1), 20,47% para o microconcreto com agregado reciclado reforçado com macrofibras (MRF2) e 11,53% para o microconcreto com agregado reciclado reforçado com fibras híbridas (MRF12). Esses resultados indicam que a presença de macrofibras não apenas favorece o ganho inicial de resistência, mas também contribui para o desenvolvimento contínuo da matriz, promovendo uma distribuição mais eficiente das tensões internas nos compósitos.

A Figura 32 apresenta os modos de ruptura típicos observados nos cubos submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial.

Figura 32 – Modos de ruptura típicos dos cubos após o ensaio de compressão axial: a) MN, b) MR, c) MRF1, d) MRF2 e e) MRF12



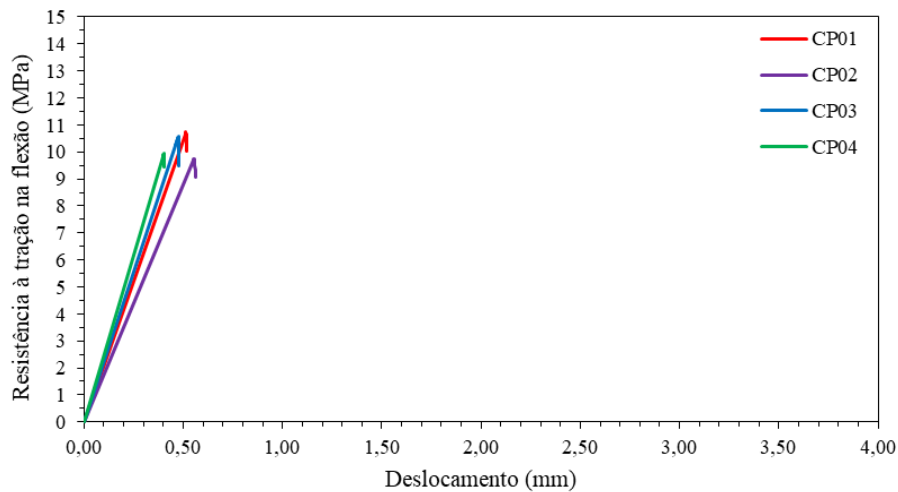
Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar as imagens da Figura 32, é possível identificar diferentes modos de ruptura entre os microconcretos avaliados. Os microconcretos sem fibras (MN e MR) apresentaram rupturas do tipo tronco de cone, caracterizadas pela formação de planos inclinados e pelo destacamento de grandes fragmentos, indicando um comportamento frágil, de forma abrupta e explosiva, sob compressão axial. Em contraste, os microconcretos com fibras de aço (MRF1, MRF2 e MRF12) exibiram modos de ruptura colunar, com fissuras verticais ao longo do eixo de carregamento e manutenção parcial da integridade geométrica dos cubos, mesmo após a ruptura. Esse comportamento é característico de compósitos cimentícios com maior tenacidade e ductilidade, evidenciando o efeito das fibras na contenção da propagação das fissuras e na redistribuição das tensões internas. De acordo com Mehta & Monteiro (2014), o modo de ruptura está diretamente relacionado à microestrutura do material e à presença de reforços, que interferem na propagação das fissuras e no mecanismo de falha.

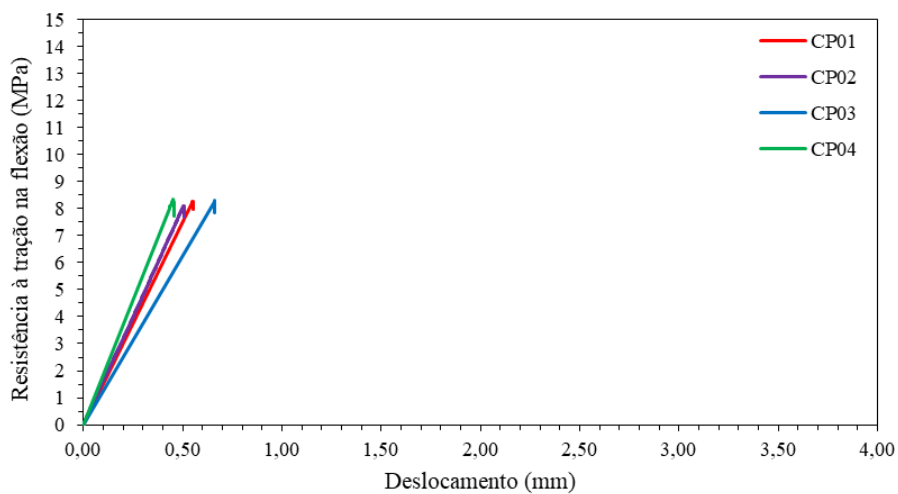
4.2.2 Comportamento à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos

Nas figuras 33, 35, 37 e 39, são mostrados os comportamentos mecânicos das placas dos microconcretos MN, MR, MRF1, MRF2 e MRF12, obtidos por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos, realizados aos 28 dias de idade. Nas Figuras 34, 36, 38 e 40, são ilustrados os modos de ruptura e as respectivas imagens radiográficas das placas, com exceção dos microconcretos sem fibras, que não foram submetidos aos exames radiográficos.

Figura 33 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 28 dias: a) MN e b) MR



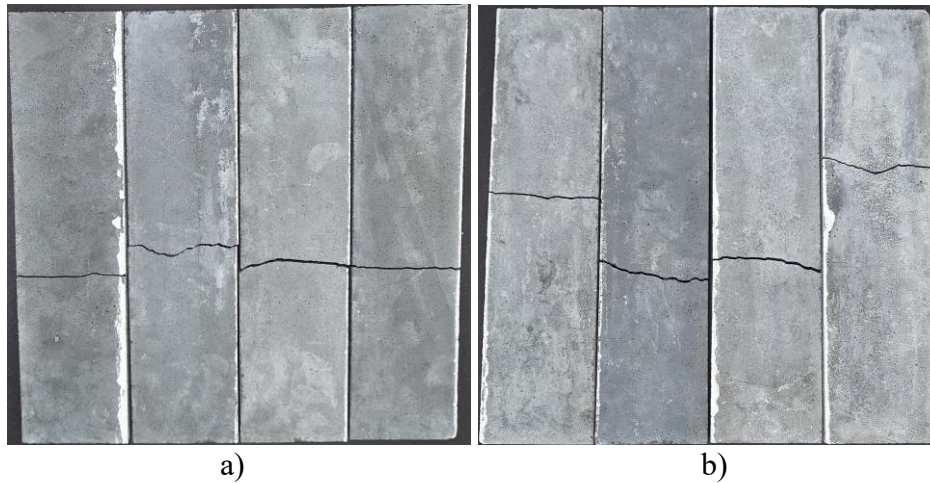
a) MN



b) MR

Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Modos de ruptura das placas dos microconcretos aos 28 dias: a) MN e b) MR

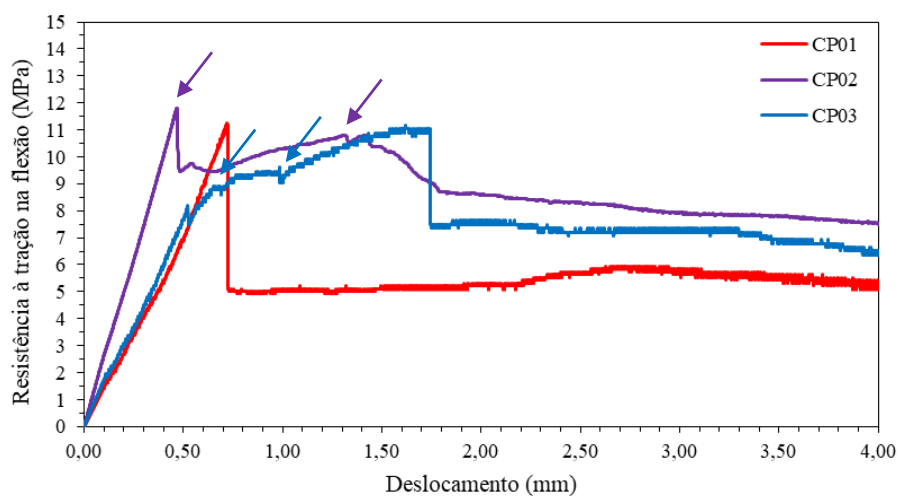


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 33 a) e b), é possível observar que as curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos MN e MR, apresentaram comportamentos semelhantes. As curvas exibem um aumento progressivo até atingir a tensão máxima, seguido por uma ruptura brusca dos elementos. No entanto, pode-se perceber que as curvas do microconcreto com agregado natural de rio (MN) apresentam uma inclinação levemente maior em comparação às do microconcreto com agregado reciclado de RCC (MR). Isso indica que o microconcreto MN apresenta desempenho superior em termos de rigidez inicial e tensão máxima. Esse desempenho superior do microconcreto MR pode ser atribuído às diferentes propriedades físicas e químicas dos agregados utilizados. O agregado natural de rio, composto principalmente por quartzo (SiO_2), possui alta dureza, baixa porosidade e forma arredondada, o que favorece melhor adesão à matriz de cimento, resultando em maior resistência à tração na flexão. Em contraste, o agregado reciclado de RCC, composto por fragmentos de pasta de cimento endurecida, rocha, cerâmica vermelha e materiais indesejáveis apresenta maior porosidade, formas irregulares e superfícies mais rugosas, o que dificulta a adesão entre o agregado e a pasta de cimento, resultando em uma redução de tensão e rigidez do microconcreto aos 28 dias de idade.

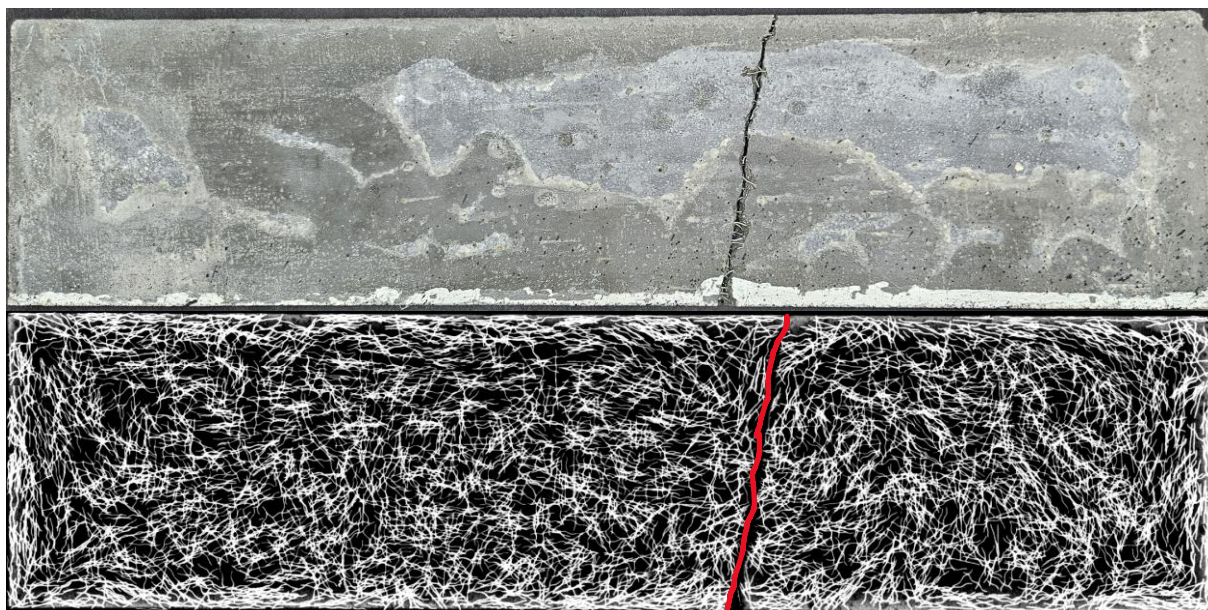
Ao analisar as imagens da Figura 34 a) e b), nota-se que todas as rupturas ocorreram no terço médio das placas, região que corresponde à zona de maior solicitação à tração no ensaio de flexão a quatro pontos. As rupturas apresentaram um comportamento frágil, sem ocorrências visíveis de fissuração prévia ou deformações antes da falha. Esse tipo de ruptura é característico de materiais cimentícios com alta resistência à compressão axial, que tendem a falhar de maneira abrupta e sem deformações plásticas significativas.

Figura 35 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF1 aos 28 dias



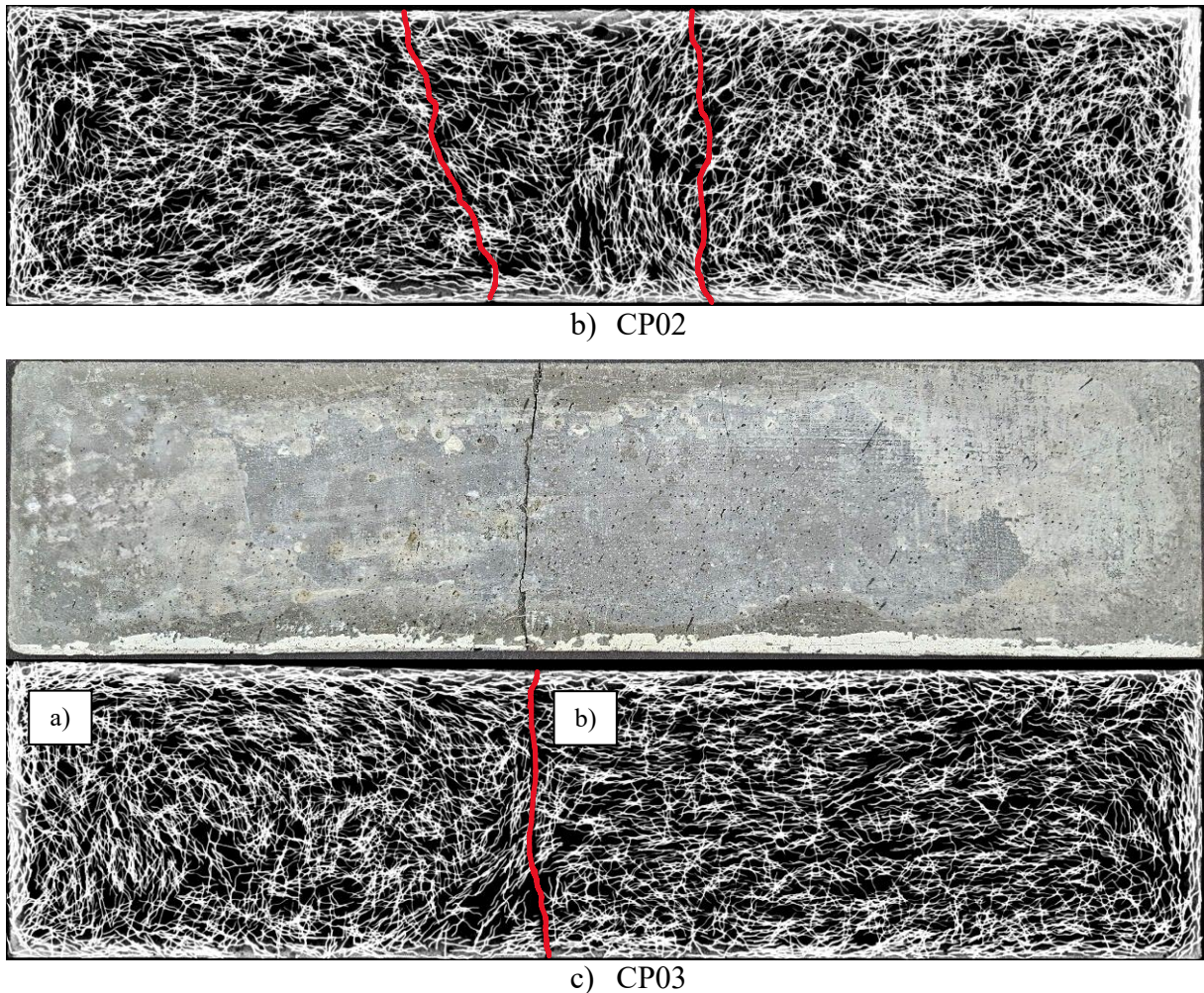
Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF1 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03



a) CP01



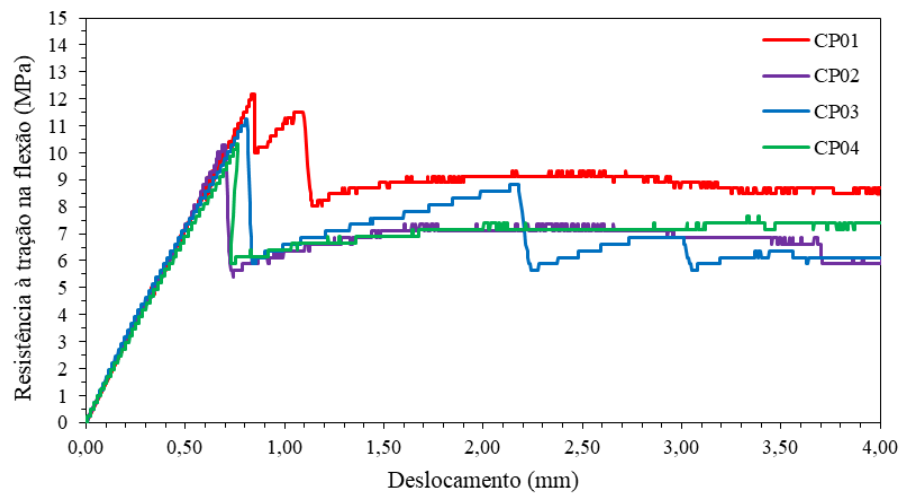


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 35 é possível observar um comportamento significativamente distinto da resistência à tração em relação ao deslocamento das três amostras ensaiadas. Para as amostras CP01 e CP02, as curvas apresentam um ramo ascendente até atingirem a tensão máxima, seguido por uma perda abrupta de tensão. No caso do CP01, a perda de tensão foi mais expressiva, seguida por um platô de resistência mantido em torno de 5 MPa, até o deslocamento de 4 mm. Além disso, pode-se observar que, na fase ascendente, o CP02 foi a amostra que apresentou maior rigidez. Ainda, para o CP02, após a primeira queda de tensão, há uma recuperação de resistência até aproximadamente 1,35 mm de deslocamento, seguida por uma perda gradual de tensão com o aumento do deslocamento. As diferenças observadas entre os comportamentos nas curvas para CP01 e CP02 estão relacionadas ao modo de fratura e à distribuição das fibras. No CP01, é possível identificar apenas uma fissura, enquanto para o CP02 observa-se a formação de duas fissuras (indicadas pelas setas roxas na Figura 35), sendo que a segunda fissura é caracterizada pela retomada do aumento de tensão até cerca de 1,35 mm de deslocamento. Por outro lado, o comportamento do CP03 apresentou a primeira

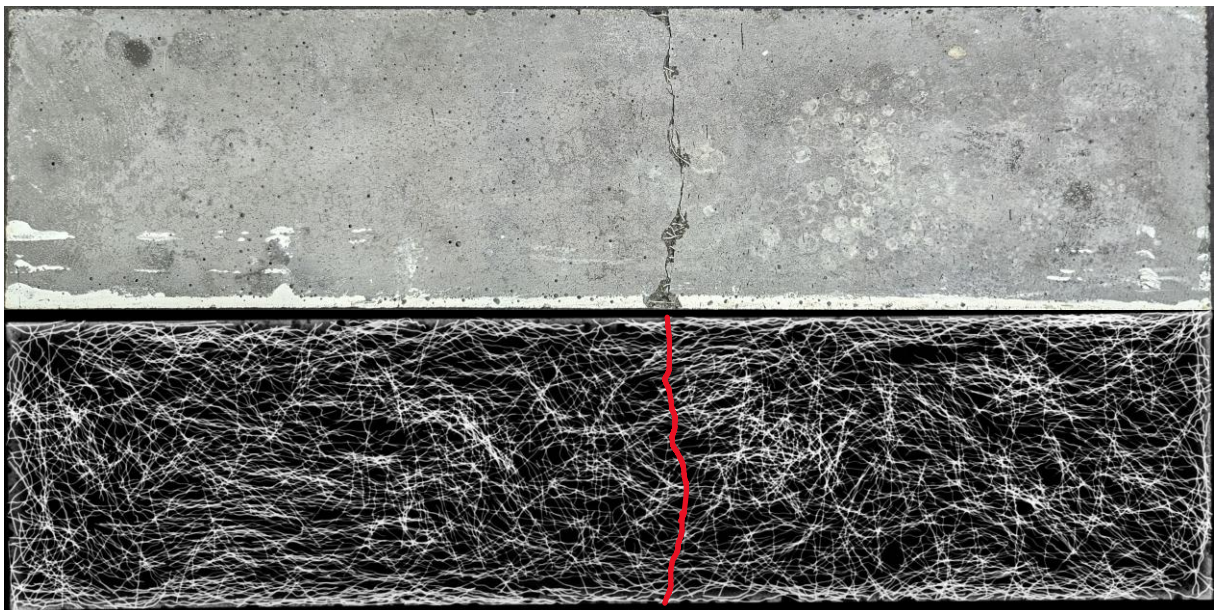
fissura com uma tensão de aproximadamente 8 MPa (~ 0,50 mm de deslocamento), seguida de um aumento contínuo da tensão até aproximadamente 1,75 mm de deslocamento, momento em que atingiu sua tensão máxima. A curva do CP03, mostra que, durante o intervalo de ~ 0,50 mm – 1,75 mm de deslocamento, houve pelo menos dois pontos de queda de tensão (destacadas pelas setas azuis na Figura 35). Esse comportamento não é evidenciado no modo de fratura da amostra, pois, conforme mostrado na Figura 36 c), observa-se apenas uma fissura. Logo, esse comportamento deve estar associado à distribuição interna das fibras. Na imagem radiográfica (Figura 36 c)), ao dividir a amostra em duas partes, observa-se: a) cerca de 1/3 da amostra, da esquerda para a direita, as fibras encontram-se mais paralelas à largura da amostra, e b) os dois terços seguintes, as fibras estão mais alinhadas ao comprimento da amostra. Nesse caso, as fibras no terço central estão mais alinhadas às tensões principais geradas pelo ensaio de flexão, o que contribui para o comportamento observado. As perdas de tensão observadas no intervalo de aproximadamente 0,50 mm – 1,75 mm de deslocamento podem ser atribuídas à perda parcial das tensões tangenciais elásticas das fibras que cortam a fissura. No final desse intervalo, (~ 1,75 mm), onde há uma queda de cerca 4 MPa, ocorre a perda total das tensões tangenciais elásticas das fibras que cortam a fissura, e a tensão se estabiliza em um patamar, indicando que as fibras são apenas arrancadas da matriz, com a contribuição das tensões friccionais predominando. Por fim, o comportamento observado nas curvas pode ser atribuído à distribuição aleatória das fibras e à orientação que estas assumem durante o lançamento do microconcreto nos moldes metálicos. De maneira geral, observa-se que as microfibras apresentaram uma dispersão relativamente homogênea ao longo do volume das placas. No entanto, é possível notar visualmente que a distribuição das fibras na amostra CP02 é consideravelmente mais uniforme quando comparada às amostras CP01 e CP03. Essa uniformidade na distribuição contribui para uma resposta mecânica mais estável e eficiente frente ao processo de fissuração progressiva durante o ensaio de flexão.

Figura 37 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF2 aos 28 dias



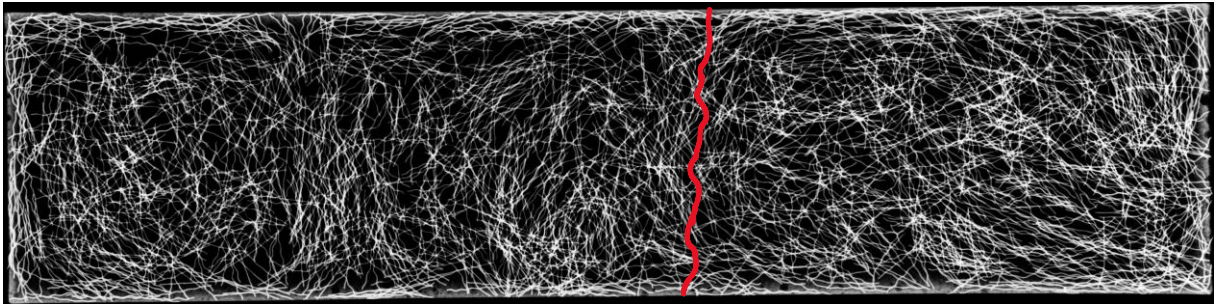
Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF2 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02, c) CP03 e d) CP04

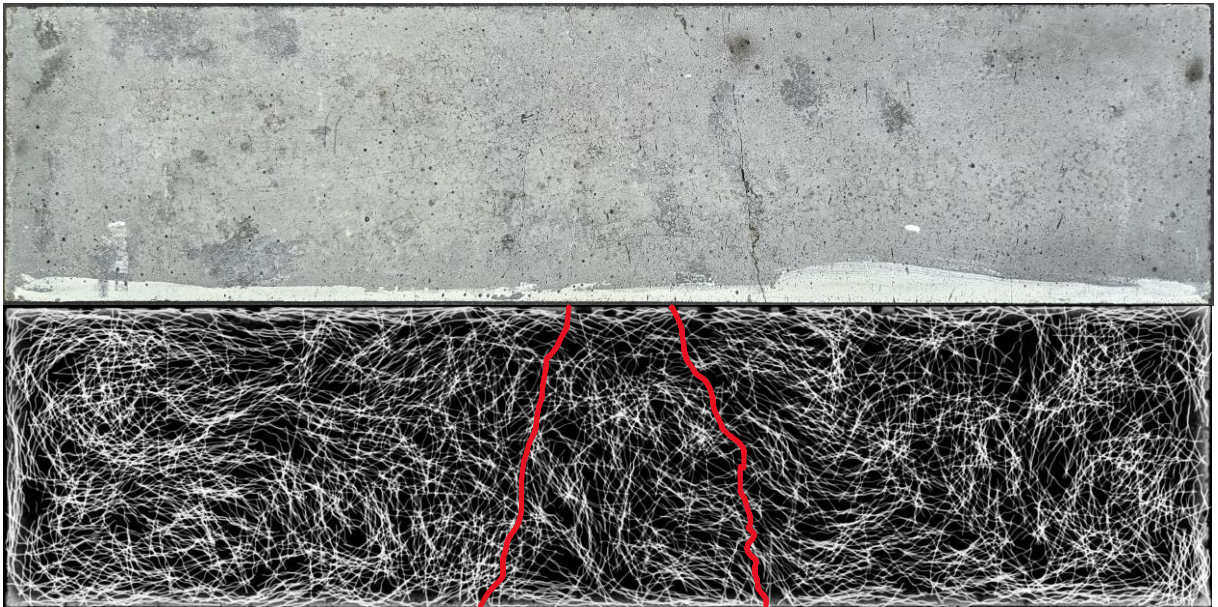


a) CP01

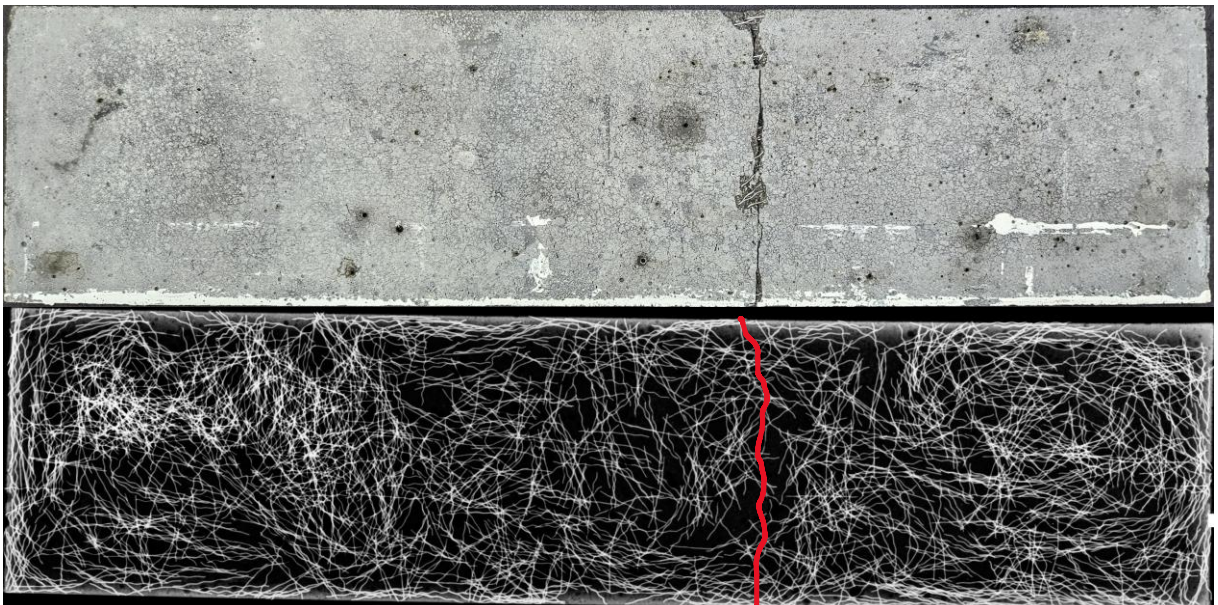




b) CP02



c) CP03



d) CP04

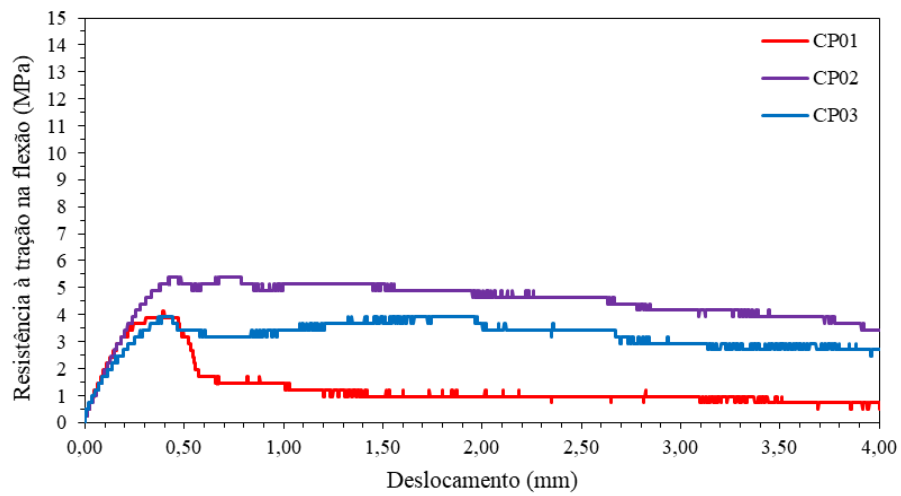
Fonte: Elaboração própria.

O comportamento das curvas dos CPs do microconcreto MRF2 apresenta um padrão mais consistente quando comparado as curvas do microconcreto MRF1. Conforme ilustrado

na Figura 37, todas as placas exibiram uma curva ascendente com rigidez semelhante até o pico máximo de tensão, seguido por uma queda abrupta e um posterior acréscimo de tensão, estabilizando-se em aproximadamente 7 MPa à medida que o deslocamento aumenta. O CP01 destacou-se pelo melhor desempenho, apresentando menor perda de tensão após o pico e mantendo uma tensão constante de aproximadamente 8,50 MPa até um deslocamento de 4 mm. Esse comportamento superior pode ser atribuído à melhor distribuição interna das fibras, evidenciada na Figura 38. Nessa figura, observa-se que a imagem radiográfica a) apresenta uma distribuição homogênea das fibras, ao passo que a imagem c) apresenta a maior heterogeneidade. O CP3 demonstrou maior capacidade de recomposição de tensão após o pico. Após uma perda inicial de cerca de 45% da tensão máxima, o material foi capaz de recuperar até 16% da tensão, atingindo cerca de 8,50 MPa em um deslocamento de aproximadamente 2,20 mm. Após esse deslocamento, observa-se nova perda de tensão, seguida de uma leve recuperação. No entanto, acredita-se que, nesse estágio, não há mais tensões tangenciais elásticas significativas capazes de gerar novas fissuras ou proporcionar aumento de tensão, fazendo com que as fibras passem apenas a ser arrancadas da matriz. Esse comportamento é compatível com o modo de ruptura observado, visto que o CP03 foi o único a apresentar duas fissuras.

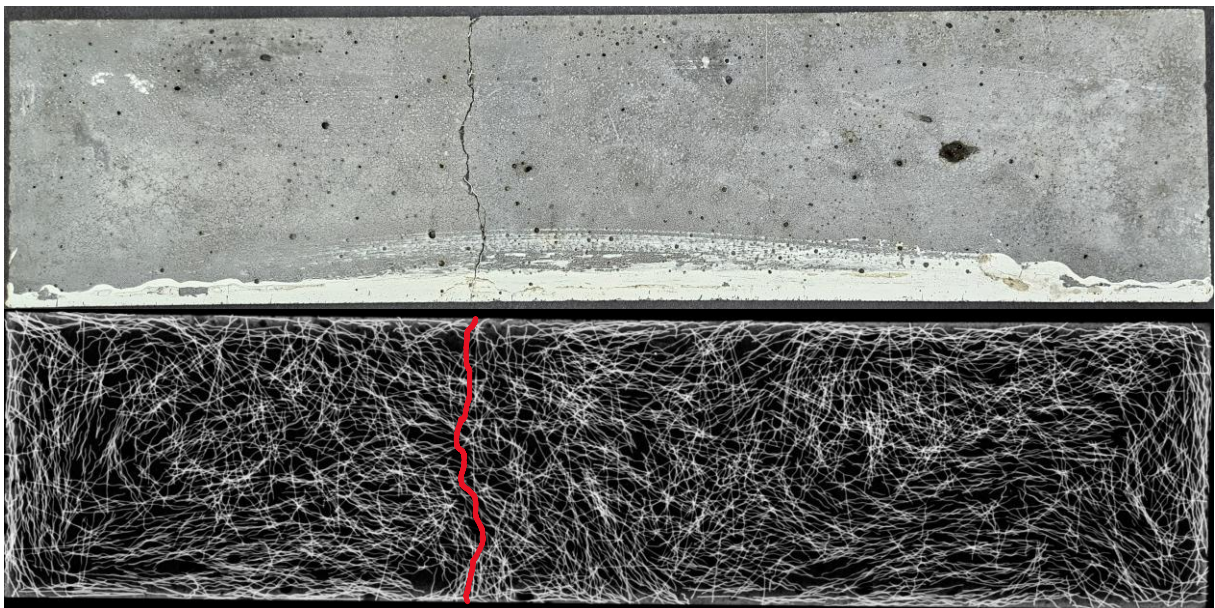
Ao observar novamente a Figura 38, nota-se que todas as placas apresentaram fissuras localizadas no terço médio. Também é possível identificar diferenças na distribuição das fibras entre os CPs, com o CP04 apresentando mais regiões escuras nas imagens radiográficas, o que indica uma dispersão menos uniforme. Além disso, nota-se um efeito parede menos pronunciado, possivelmente associado à menor quantidade de fibras/m³ utilizada nesta mistura, conforme mencionado anteriormente. Esse comportamento diferencia-se das placas do microconcreto MRF1, nas quais foi observada uma distribuição mais homogênea de fibras, atribuídas às características geométricas, como a relação de aspecto, que possibilita uma maior quantidade de fibras por volume e contribui para um efeito parede mais acentuado.

Figura 39 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF12 aos 28 dias



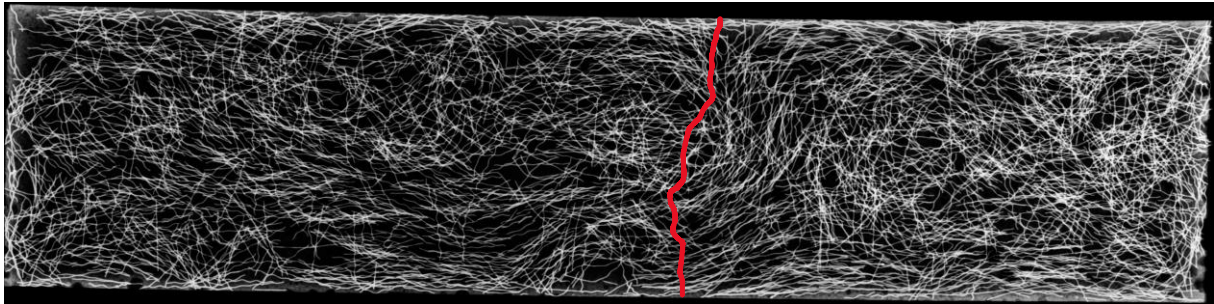
Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF12 aos 28 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03

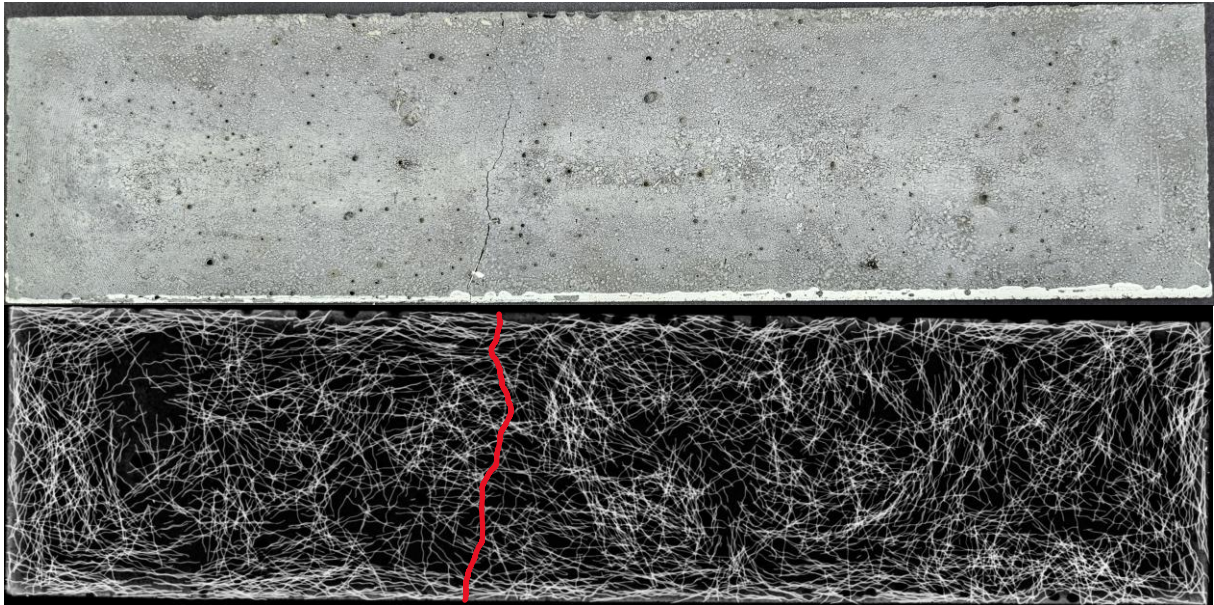


a) CP01





b) CP02



c) CP03

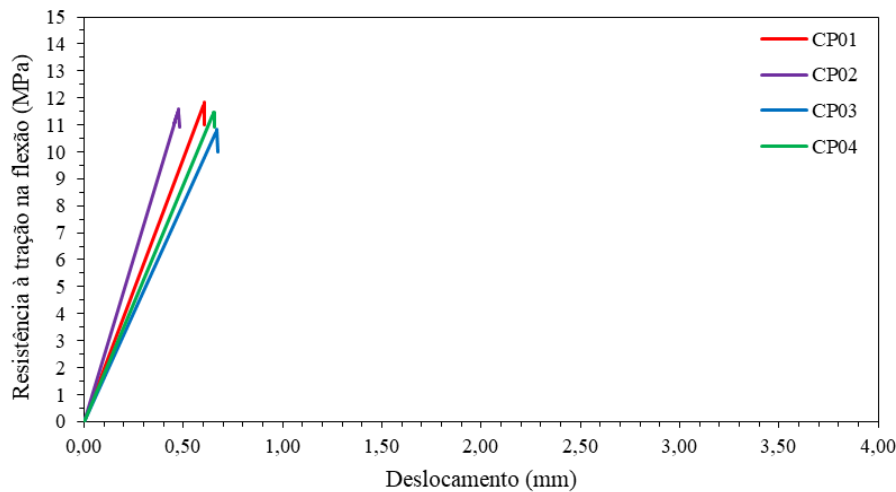
Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar na Figura 39 que as curvas dos CPs apresentam rigidez inicial semelhante no ramo ascendente. Com exceção do CP01, os demais CPs demonstraram um comportamento pós pico mais gradual com o aumento do deslocamento, indicando melhoria nas condições de ductilidade e uma ruptura mais controlada. No modo de ruptura, observado na Figura 40, todas as amostras apresentaram uma única fissura. As imagens radiográficas revelam uma distribuição aleatória das fibras híbridas, com as regiões na cor branca indicando maior densidade de fibras e os vazios em preto correspondendo a áreas com ausência de reforço. No CP01, observa-se uma maior concentração de fibras na região mais solicitada da placa durante o ensaio. No entanto, grande parte dessas fibras encontra-se orientada perpendicularmente ao comprimento da amostra, ou seja, paralela ao plano de fissuração, o que limita sua atuação na redistribuição das tensões. Esse posicionamento inadequado contribui para a menor resistência residual, confirmando o comportamento pós pico menos favorável observado na curva. No CP02, verifica-se uma distribuição assimétrica de fibras, com maior concentração na extremidade direita da placa, enquanto a extremidade oposta apresenta

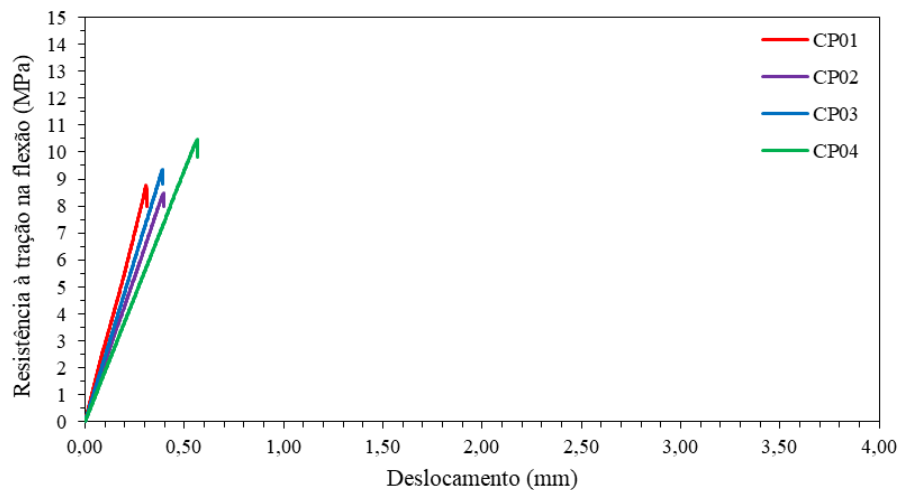
diversas regiões com baixa densidade. Apesar disso, há uma boa presença de fibras na região de propagação da fissura, com parte delas orientadas adequadamente à direção de tração na flexão, o que favorece a atuação eficaz no mecanismo de ponteamto. Essa configuração resultou em um comportamento pós fissuração mais estável, com maior resistência residual e melhor tenacidade. Enquanto, o CP03 apresenta uma distribuição mais homogênea das fibras ao longo de todo o CP, com menor ocorrência de regiões escuras e maior uniformidade na dispersão do reforço.

Os comportamentos mecânicos das placas dos microconcretos MN, MR, MRF1, MRF2 e MRF12, avaliados a partir dos ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos aos 90 dias de idade, estão representados nas Figuras 41, 43, 45 e 47, respectivamente. As Figuras 42, 44, 46 e 48 ilustram os modos de ruptura de todas as placas ensaiadas, assim como as imagens radiográficas das placas reforçadas com fibras de aço.

Figura 41 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos aos 90 dias: a) MN e b) MR



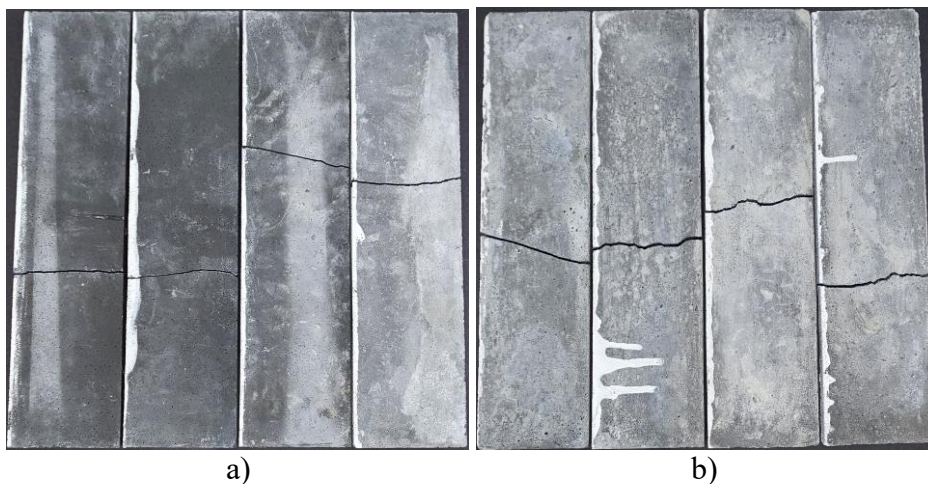
a) MN



b) MR

Fonte: Elaboração própria.

Figura 42 – Modos de ruptura das placas dos microconcretos aos 90 dias: a) MN e b) MR



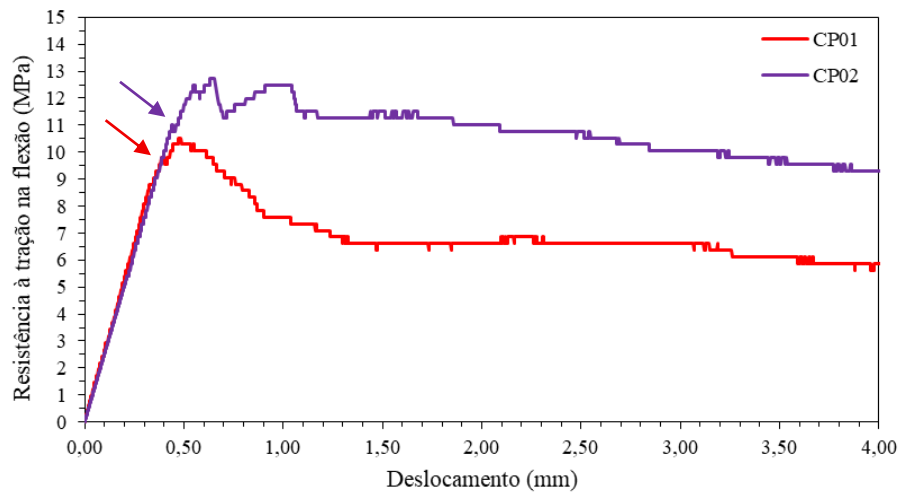
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 41, observa-se que os microconcretos MN e MR, aos 90 dias de idade, apresentaram o mesmo comportamento à flexão observado aos 28 dias. As curvas mostram um ramo ascendente até atingir a tensão máxima, seguido por uma queda abrupta de tensão. Na idade de 90 dias, nota-se que a rigidez dos microconcretos é igual, comportamento distinto do observado aos 28 dias, quando o microconcreto MN apresentou rigidez superior em relação ao MR. Essa alteração no comportamento ao longo do tempo pode estar relacionada ao possível efeito pozolânico do agregado reciclado de RCC. Com o avanço da cura, o agregado reciclado, composto por materiais como pasta de cimento (50,98%) e cerâmica vermelha (19,24%), que contém sílica amorfa, pode reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) gerado durante a hidratação do cimento. Essa reação resulta na formação de produtos de hidratação adicionais, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que contribui

para o aumento de resistência e rigidez do microconcreto com o tempo. Esse efeito pozolânico pode ter sido intensificado à medida que os dias de cura avançaram, promovendo uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do microconcreto MR.

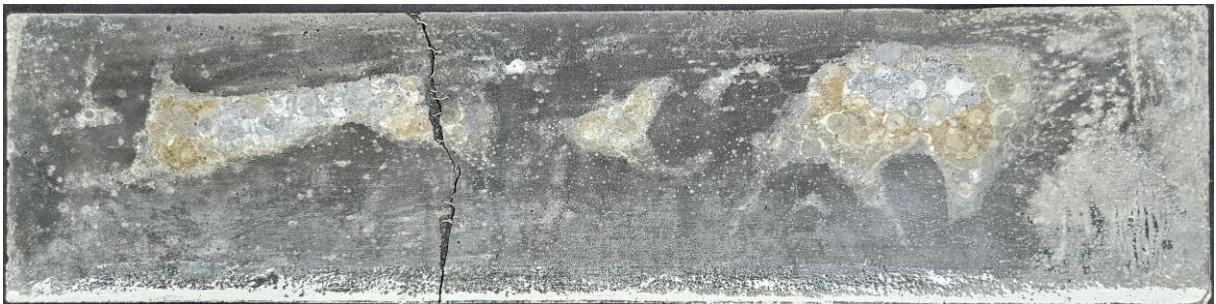
A partir da análise das imagens da Figura 42, verifica-se que todas as rupturas ocorreram no terço médio das placas, região correspondente à zona de maior momento fletor. As falhas ocorreram de forma repentina, apresentando características típicas de ruptura frágil, não sendo identificadas fissuras secundárias ou deformações visíveis que indicassem um processo gradual de falha.

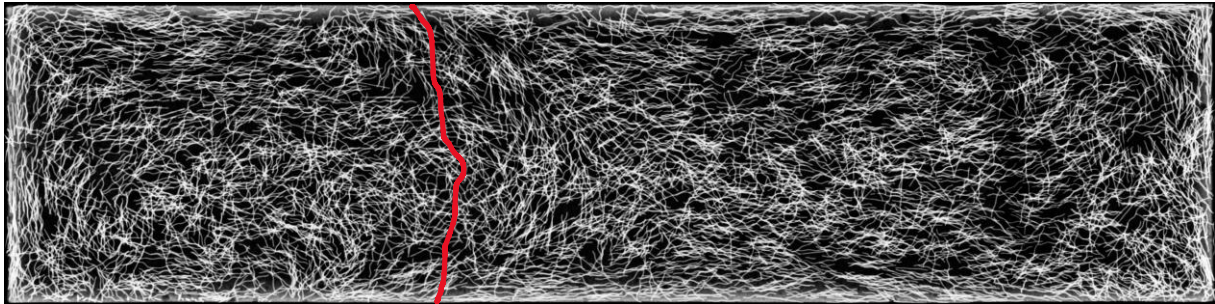
Figura 43 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF1 aos 90 dias



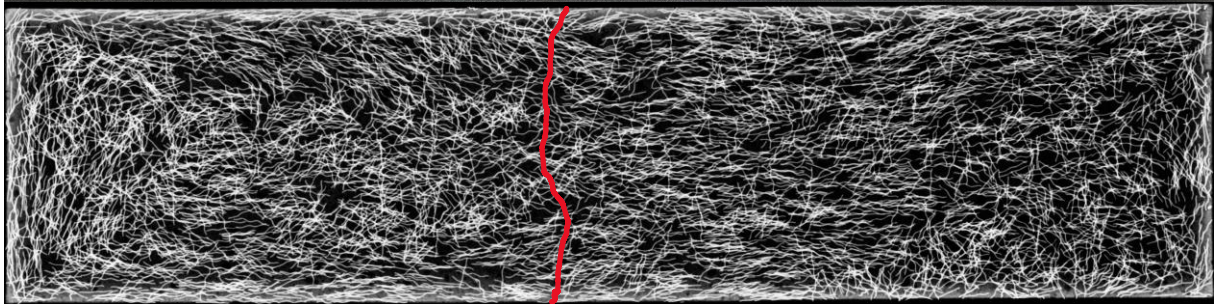
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF1 aos 90 dias: a) CP01 e b) CP02





a) CP01



b) CP02

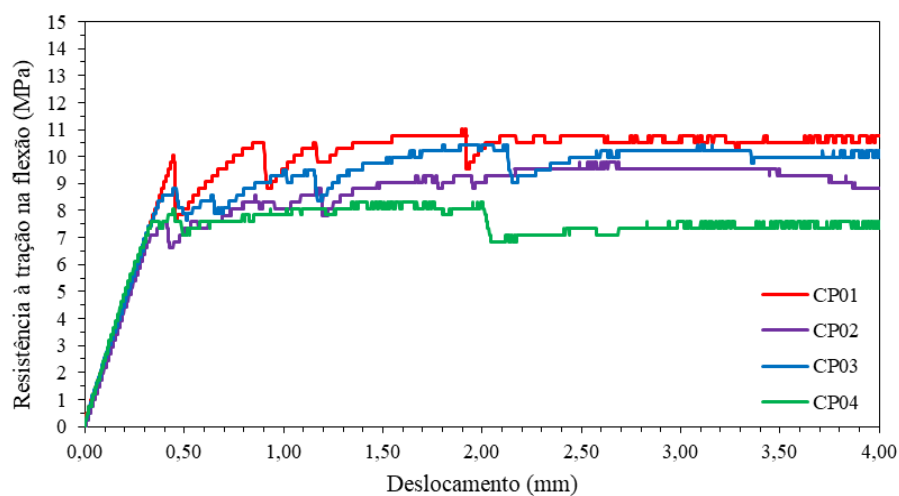
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 43, é possível observar que o ramo ascendente das curvas dos CPS do microconcreto MRF1 ao 90 dias de idade apresenta a mesma rigidez, indicando constante de rigidez. Nota-se ainda que o aparecimento da primeira fissura ocorreu antes de alcançar o pico de tensão, conforme indicado pelas setas no gráfico. Esse comportamento difere do observado aos 28 dias, quando a fissura principal se formava no instante de máxima tensão. Além disso, o comportamento pós pico não apresenta quedas bruscas de tensão, revelando um desempenho mais gradual e, conseqüentemente mais dúctil. Tal resposta está associada a melhorias na interface entre as fibras e a matriz cimentícia, resultantes do envelhecimento do material e da presença de adições minerais. Destaca-se ainda a influência do agregado reciclado de RCC utilizado, que contém aproximadamente 19,24% de cerâmica vermelha, componente que também pode favorecer as reações pozolânicas e contribuir para o desenvolvimento microestrutural do composto, além de ser um reservatório de água importante para que a transformação microestrutural aconteça. Outro aspecto relevante é que, mesmo aos 4 mm de deslocamento, a tensão ainda se mantém superior a 50% da tensão

máxima, o que evidencia um desempenho pós pico aprimorado. Esse comportamento confirma a hipótese de que a interface fibra-matriz foi significativamente modificada, proporcionando maior capacidade de absorção de energia, e portanto, uma melhor tenacidade do microconcreto.

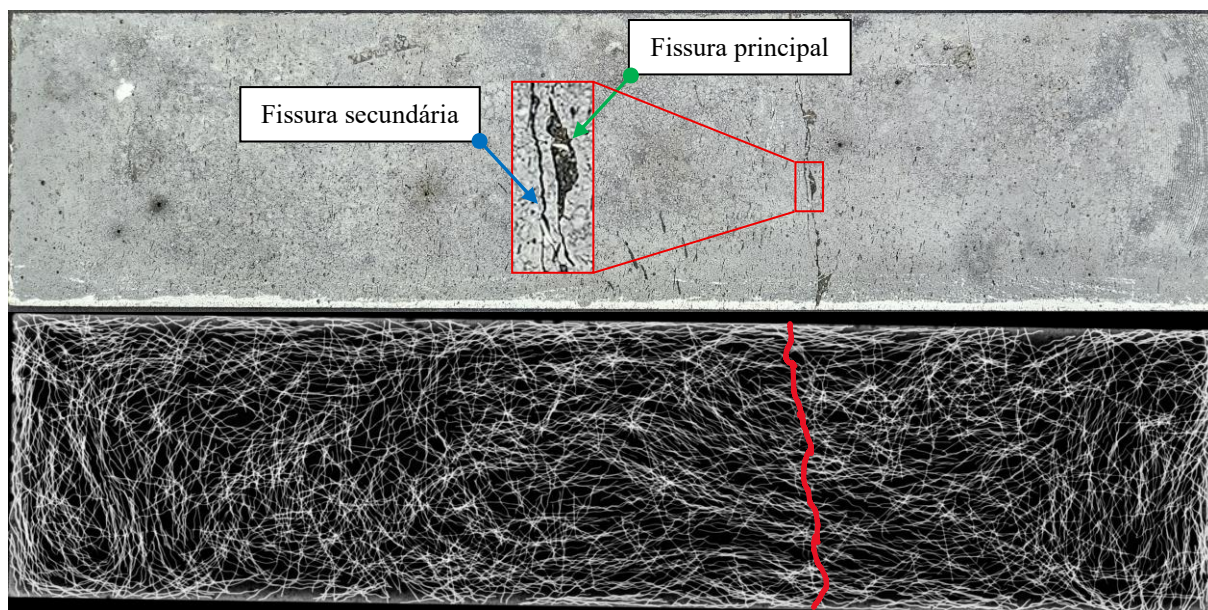
Conforme a Figura 44, o modos de ruptura nas placas ensaiadas se concentraram no terço médio. A partir da análise das imagens radiográficas das placas, observa-se que as fibras apresentaram uma distribuição homogênea ao longo do volume dos CPS, com menor presença de regiões escuras e ausência de um efeito parede pronunciado. Em ambas as placas, verifica-se uma concentração significativa de fibras na região central, coincidente com a área de propagação da fissura, o que sugere uma efetiva atuação no controle da abertura das mesmas. No que se refere à orientação, nota-se que, embora muitas fibras se encontram dispostas de forma aleatória, há uma quantidade relevante com orientação transversal ao plano de fissuração. Sendo essa configuração, favorável à redistribuição das tensões, contribuindo diretamente para o aumento da resistência residual e da tenacidade, conforme observado nos ensaios mecânicos. A imagem do CP01 evidencia uma concentração mais densa de fibras na extremidade esquerda, enquanto o CP02 apresenta uma distribuição mais uniforme entre as extremidades, o que pode refletir pequenas variações no processo de lançamento do material durante a moldagem.

Figura 45 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF2 aos 90 dias

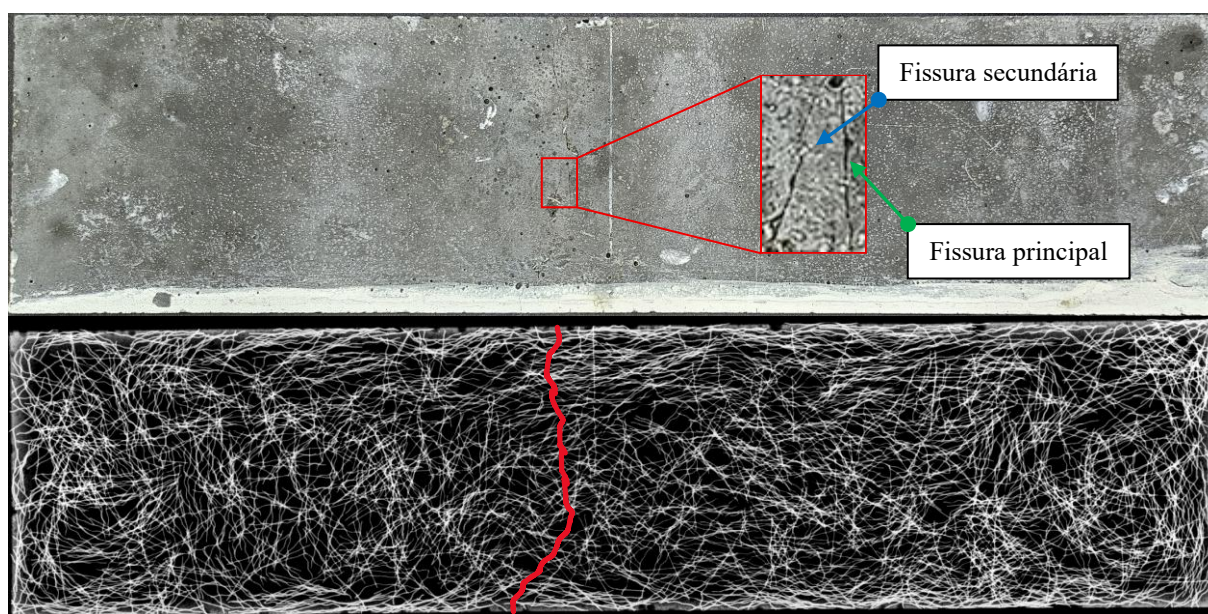


Fonte: Elaboração própria.

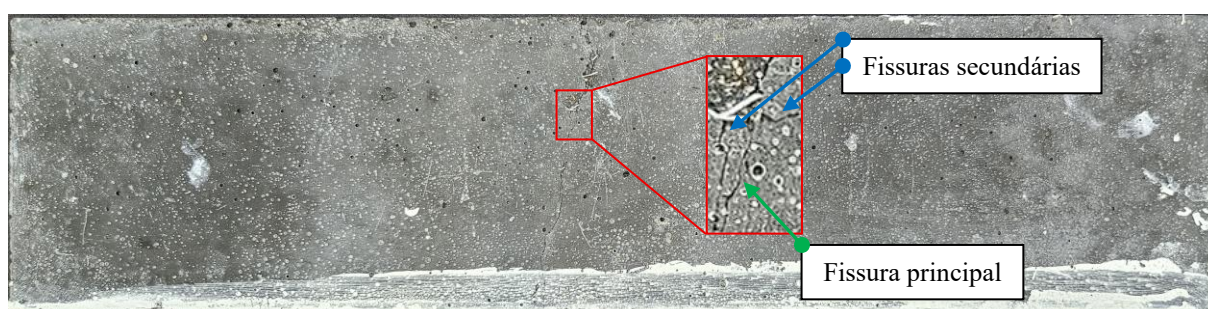
Figura 46 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF2 aos 90 dias: a) CP01, b) CP02, c) CP03 e d) CP04

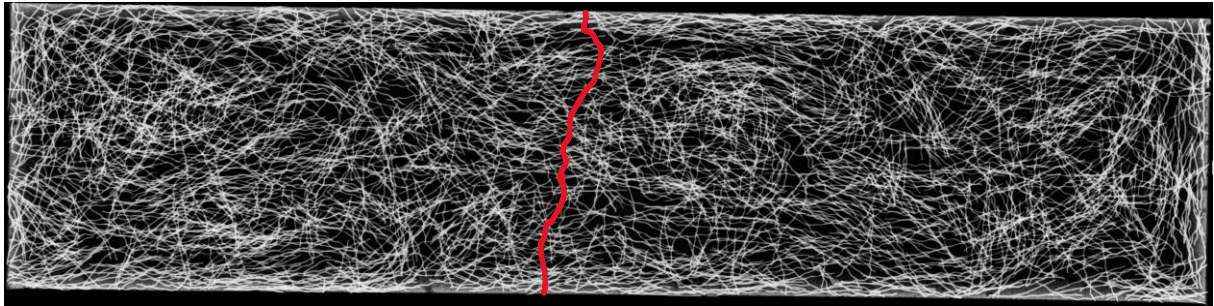


a) CP01

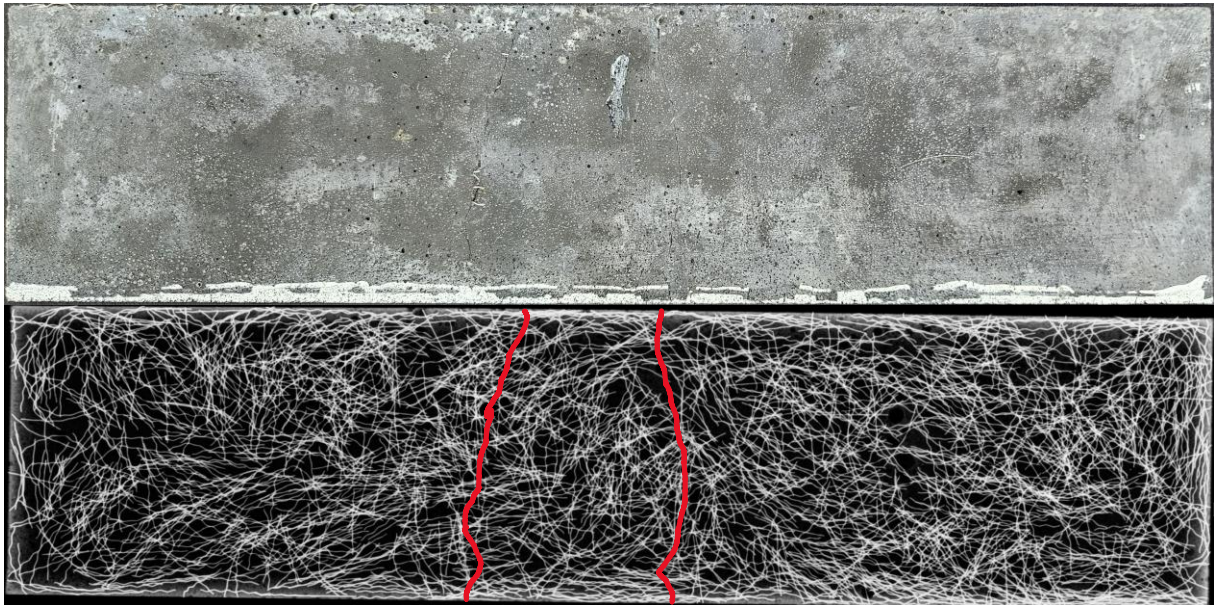


b) CP02





c) CP03



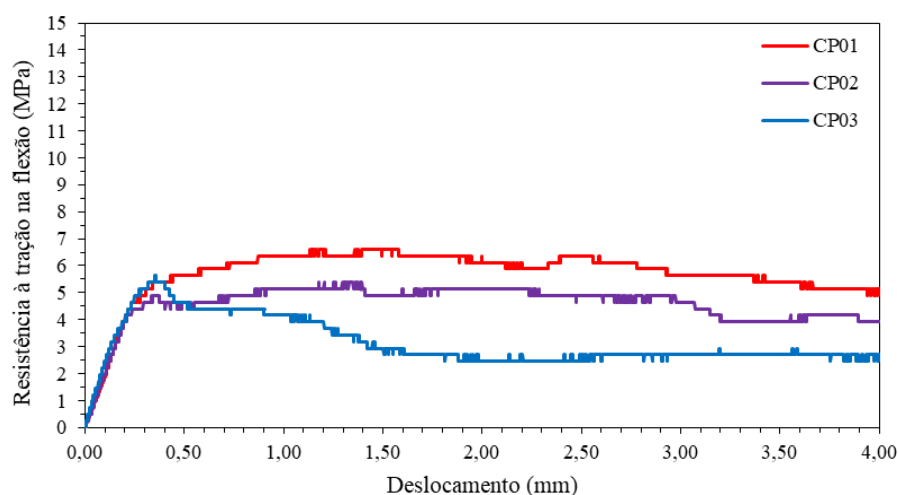
d) CP04

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 45, observa-se que as tensões máximas ocorreram após o ramo ascendente e linear das curvas, indicando um comportamento elastoplástico bem definido, distinto daquele observado aos 28 dias. Além disso, acredita-se uma melhora mais significativa na interface entre as fibras de aço e a matriz, quando comparado ao microconcreto MRF1. Tal melhoria está relacionada ao maior comprimento das fibras utilizadas na composição do MRF2, as quais possuem o dobro do comprimento das fibras empregadas no MRF1. Como consequência, ocorre um aumento do efeito das tensões tangenciais elásticas na transferência de carga entre a matriz e as fibras. Essas tensões, responsáveis pelo ancoramento inicial das fibras na matriz, retardam a completa transição para o regime de tensões tangenciais friccionais. Esse comportamento é refletido nas curvas tensão x deslocamento, que apresentam pequenas quedas de tensão seguidas por elevações sucessivas. Esse processo cíclico de perda parcial e reestabelecimento das tensões caracteriza a atuação de fibras longas, conferindo ao compósito um comportamento estável com o aumento do deslocamento. Outro aspecto relevante, refere-se ao modo de fratura observado, principalmente nos CPs 01, 02 e

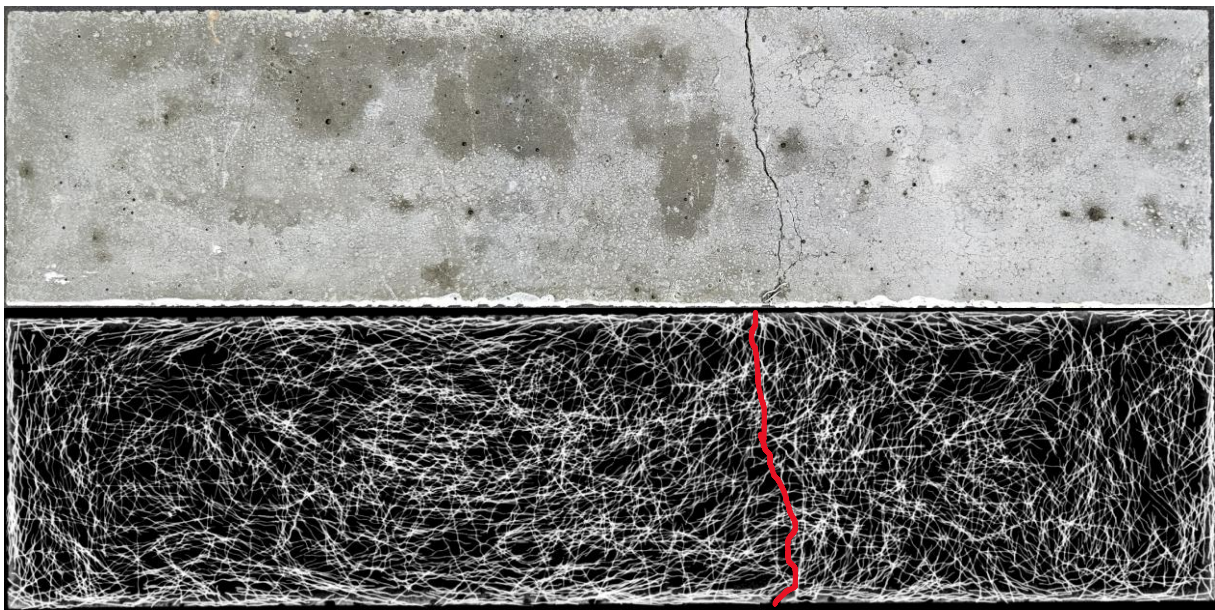
03, os quais apresentaram a formação geral de uma única fissura, conforme apresentado na Figura 46. No entanto, nota-se, a presença de microfissuras nas extremidades da fissura principal, configurando regiões de nucleação secundária. Esse comportamento constitui mais uma evidência da melhoria na interface entre as fibras de aço e a matriz cimentícia, permitindo a transferência de tensões para regiões adjacentes à fissura principal, promovendo deformações iguais com as da matriz e, conseqüentemente, a formação de novas fissuras, conforme evidenciado na Figura 46 a), b) e c). Por fim, destaca-se que, ao atingir o deslocamento de 4 mm, a tensão residual manteve-se praticamente constante, ou até superior, à tensão da primeira fissura. Ao analisar as imagens radiográficas das placas, é possível observar uma distribuição relativamente homogênea das macrofibras ao longo do volume das placas. A predominância de regiões claras, associadas a maior densidade de fibras, e a baixa ocorrência de zonas escuras ou vazios pronunciados indicam um bom desempenho nos processos de mistura, lançamento e adensamento do microconcreto. Esse comportamento sugere uma adequada dispersão das fibras na matriz cimentícia, condição fundamental para assegurar a atuação adequada do reforço fibroso na contenção da fissuração e no ganho de tenacidade do compósito.

Figura 47 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) do microconcreto MRF12 aos 90 dias

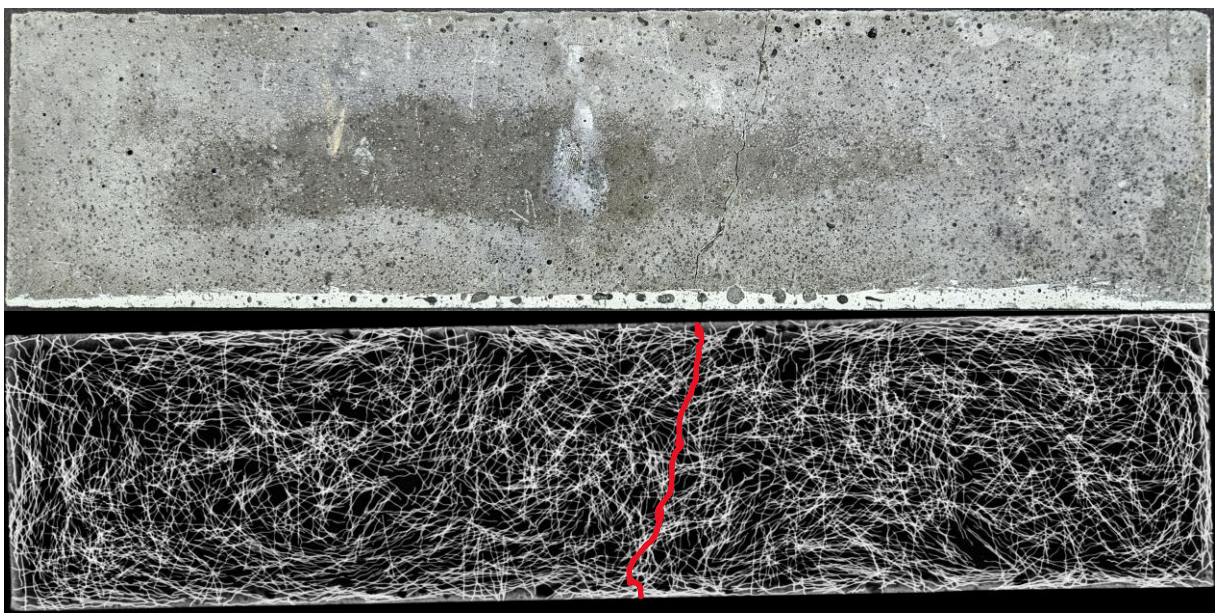


Fonte: Elaboração própria.

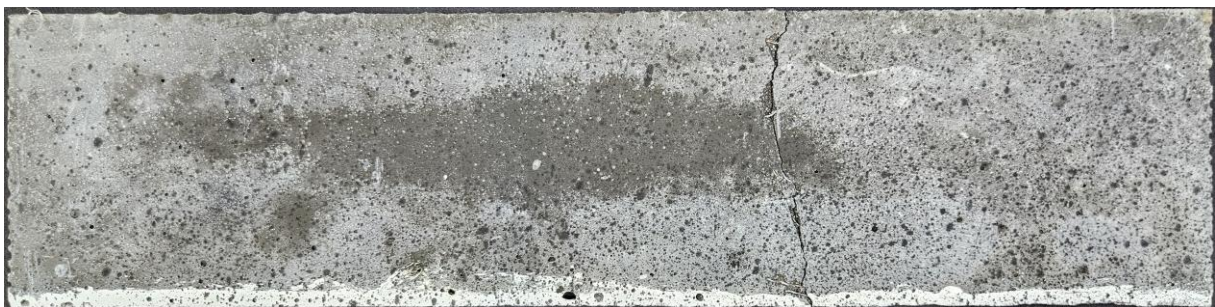
Figura 48 – Modo de ruptura e imagem radiográfica das placas do microconcreto MRF12 aos 90 dias: a) CP01, b) CP02 e c) CP03

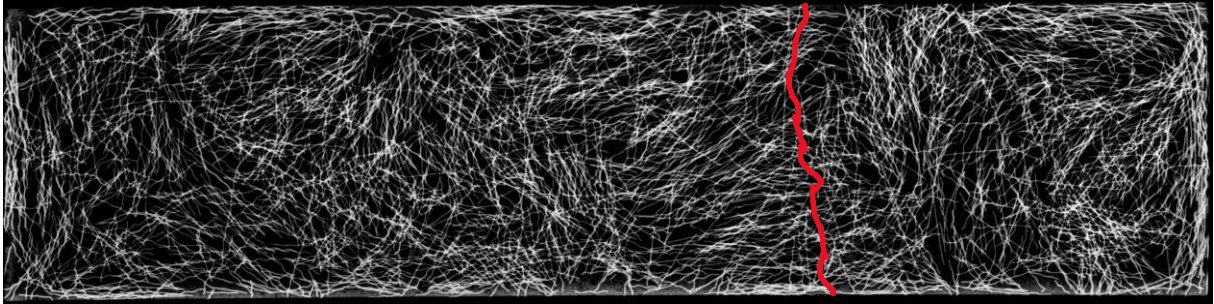


a) CP01



b) CP02





c) CP03

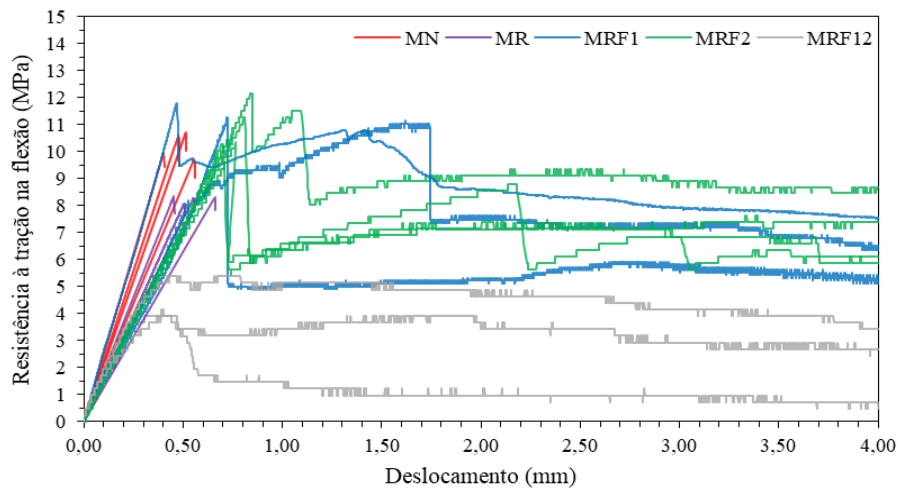
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 47, é possível observar que as curvas dos CPs do microconcreto MRF12, aos 90 dias de cura, apresentam rigidez semelhante no ramo ascendente linear, comportamento também verificado nos ensaios realizados aos 28 dias idade. O CP 01 demonstrou o melhor desempenho entre os CPs analisados, atingindo a maior tensão máxima e mantendo um valor residual praticamente constante até o deslocamento de 4 mm. Esse comportamento indica uma boa capacidade de redistribuição de tensões e absorção de energia, associada a uma distribuição mais uniforme das fibras no terço central da placa, região crítica onde ocorre o maior momento fletor. Essa homogeneidade foi confirmada pela imagem radiográfica (Figura 48 a)), na qual observa-se uma maior densidade e melhor orientação das fibras na zona de fissura. O CP02 apresentou desempenho intermediário, com tensão máxima inferior à do CP01, mas ainda manteve um nível de resistência estável após a primeira fissura. No entanto, a distribuição das fibras na região central mostrou-se menos homogênea e mais desorganizada, o que pode ter comprometido parcialmente a atuação das fibras na contenção da fissuração e na manutenção da capacidade resistente após o pico de tensão. Por outro lado, o CP03 apresentou o desempenho menos satisfatório entre os três CPs. A tensão máxima foi atingida logo após o ramo ascendente, em torno de 0,35 mm de deslocamento, seguida por uma queda de aproximadamente 1 MPa. Após essa queda, a curva manteve-se um patamar relativamente constante até cerca de 1,20 mm, quando novamente apresentou uma queda de tensão, estabilizando-se até a interrupção do ensaio. Na Figura 48 c) é possível visualizar uma menor homogeneidade na distribuição das fibras no terço médio da placa, o que justifica a redução da eficiência no controle da fissuração e a menor resistência residual observada. Além disso, observa-se que todas as placas apresentaram uma única fissura.

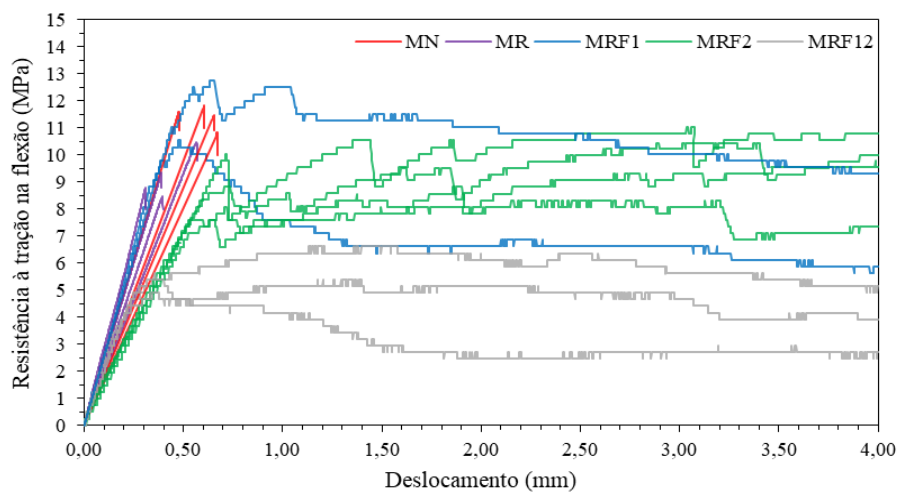
A Figura 49 a) e b) apresenta as 35 curvas obtidas a partir dos ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos, realizados nos microconcretos nas idades de 28 e 90 dias. As curvas estão identificadas por cores distintas, correspondentes a cada tipo de microconcreto produzido, o que possibilita uma interpretação visual do comportamento mecânico ao longo

do tempo de cura. Foram plotadas, para cada idade de ensaio, quatro curvas na cor vermelha para o microconcreto com agregado natural de rio (MN), quatro curvas na cor roxa para o microconcreto com agregado reciclado de RCC (MR), quatro curvas na cor verde para o microconcreto com agregado reciclado de RCC reforçado com macrofibras (MRF2) e três curvas na cor cinza para o microconcreto com agregado reciclado de RCC reforçado com fibras híbridas (MRF12). Quanto ao microconcreto com agregado reciclado de RCC reforçado com microfibras (MRF1), foram plotadas três curvas aos 28 dias e duas curvas aos 90 dias, representadas na cor azul.

Figura 49 – Curvas de resistência à tração na flexão a quatro pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos microconcretos: a) aos 28 dias e b) aos 90 dias



a) Aos 28 dias



b) Aos 90 dias

Fonte: Elaboração própria.

A partir das curvas apresentadas na Figura 49, referentes aos ensaios de resistência à tração na flexão a quatro pontos, é possível avaliar o comportamento mecânico das placas produzidas com os microconcretos MN, MR, MRF1, MRF2 e MRF12, nas idades de 28 e 90 dias. De modo geral, é possível observar que, aos 28 dias (Figura 49 a)), a mistura MN apresentou maior rigidez, refletindo uma constante de rigidez superior em relação às demais misturas produzidas. As composições contendo agregado reciclado de RCC, independentemente da incorporação de fibras de aço, demonstraram rigidez semelhante, com exceção de uma amostra do microconcreto MRF1, cujo comportamento rígido foi comparável ao do microconcreto MN. Adicionalmente, nota-se que, para a maioria das composições, a tensão máxima ocorreu após o ramo linear ascendente, sendo sucedida por uma queda abrupta de tensão. Em contraste, aos 90 dias (Figura 49 b)), observa-se uma inversão no comportamento mecânico, os microconcretos com agregado reciclado de RCC, tanto com quanto sem reforço fibroso, apresentaram rigidez igual ou superior àquela observada no microconcreto com agregado natural de rio. Tal comportamento pode ser atribuído à evolução microestrutural dos microconcretos contendo agregado reciclado ao longo do tempo de cura, resultando em maior compactação e reatividade pozolânica. Ainda com base nas curvas, verifica-se que os microconcretos sem adição de fibras (MN e MR) apresentaram comportamento predominantemente frágil, com resposta linear até o pico de resistência, seguido de ruptura abrupta e ausência de capacidade residual. Por outro lado, os microconcretos reforçados com fibras de aço, principalmente MRF1 e MRF2 aos 90 dias de idade, demonstraram o pico de tensão máxima após a formação da primeira fissura, indicando comportamento mais tenaz e evidenciando o efeito hardening. Observa-se, nesses casos, a presença de um maior patamar de resistência residual após o pico, o que evidencia a atuação efetiva das fibras como mecanismos de transferência de tensões internas e controle de abertura de fissuras. Esse desempenho também indica um aprimoramento da interface entre a matriz cimentícia, o agregado reciclado de RCC e as fibras, favorecendo a dissipação de energia e a manutenção da integridade estrutural mesmo após o início da fissuração. O microconcreto MRF2, foi o que apresentou os melhores resultados em termos de resistência residual e deslocamento de tensão máxima, principalmente aos 90 dias de cura, sugerindo uma dispersão mais eficaz das macrofibras e adequada ancoragem à matriz, mesmo com o menor número de fibras/m³, embora com o maior IR em comparação aos demais microconcretos reforçados.

São apresentados, na Tabela 13, os resultados das tensões máximas à tração na flexão a quatro pontos e dos deslocamentos (média, desvio padrão e coeficiente de variação), dos microconcretos ensaiados aos 28 e 90 dias de idade.

Tabela 13 – Resultados de resistência à tração na flexão a quatro pontos e deslocamento máximos (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos microconcretos aos 28 e 90 dias, conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010)

| Característica | Idade de cura | Microconcreto | | | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| | | MN | MR | MRF1 | MRF2 | MRF12 |
| Tensão média (MPa) | 28 | 10,25 | 8,25 | 11,41 | 11,01 | 4,48 |
| | 90 | 11,43 | 9,26 | 11,63 | 9,89 | 5,88 |
| DV*/CV* (MPa/%) | 28 | 0,49/4,73 | 0,11/1,35 | 0,35/3,03 | 0,88/8,04 | 0,79/17,62 |
| | 90 | 0,42/3,67 | 0,87/9,44 | 1,56/13,40 | 1,16/11,75 | 0,65/11,02 |
| Deslocamento médio (mm) | 28 | 0,49 | 0,54 | 0,94 | 0,78 | 0,55 |
| | 90 | 0,60 | 0,41 | 0,57 | 1,93 | 0,87 |
| DV*/CV* (mm/%) | 28 | 0,06/13,29 | 0,09/16,23 | 0,61/64,66 | 0,06/8,17 | 0,15/27,58 |
| | 90 | 0,09/14,61 | 0,11/26,19 | 0,11/19,85 | 0,56/29,27 | 0,45/51,77 |

* DV = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 13, observa-se que, aos 28 dias de idade, o microconcreto MN obteve uma tensão média à tração na flexão de 10,25 MPa, valor aproximadamente 24% superior à tensão média de 8,25 MPa atingida pelo microconcreto MR. Essa diferença evidencia a influência negativa da substituição total do agregado natural de rio por agregado reciclado de RCC, possivelmente associado à maior porosidade, à elevada absorção de água e à menor qualidade da zona de transição interfacial (ZTI) no microconcreto com agregado reciclado. Aos 28 dias, os microconcretos reforçados com fibras de aço (MRF1 e MRF2) apresentaram desempenho superior ao microconcreto com agregado reciclado de RCC sem fibras (MR), evidenciando a contribuição das fibras para a resistência na flexão. O microconcreto MRF1, reforçado com microfibras, atingiu a maior tensão média (11,41 MPa), representando um aumento de aproximadamente 38,30% em relação ao MR (8,25 MPa). O MRF2, com macrofibras, obteve 11,01 MPa, um incremento de 33,50% em comparação ao microconcreto de referência (MR). Por outro lado, o MRF12, composto por reforço híbrido, apresentou o pior desempenho (4,48 MPa), sendo 47,50% inferior ao MR, possivelmente em

razão de uma má dispersão das fibras ou da ausência de sinergia eficaz entre os dois tipos de reforço.

Aos 90 dias de cura, a maioria dos microconcretos apresentou incremento na resistência à tração na flexão, com exceção do microconcreto MRF2, que demonstrou uma leve redução em relação aos 28 dias. Contudo, a análise estatística dos resultados entre os diferentes tempos de cura indicou que, para todos os microconcretos analisados, não houve variações significativas entre os ensaios realizados aos 28 e 90 dias. O microconcreto MN, alcançou 11,43 MPa aos 90 dias, representando um acréscimo de 11,50% em relação à tensão máxima observada aos 28 dias. O microconcreto MR, por sua vez, obteve 9,26 MPa, com um aumento de 12,20% em comparação aos 28 dias de idade. A diferença relativa entre MN e MR manteve-se em torno de 23,40%, reforçando a influência positiva do agregado natural na resistência, mesmo após o amadurecimento da matriz. Entre os microconcretos com fibras de aço, o MRF1 manteve-se com a maior tensão máxima média (11,63 MPa), o que representa um ganho de 25,60% em relação ao microconcreto MR. O MRF2, apresentou uma leve redução no desempenho, passando de 11,01 MPa aos 28 dias para 9,89 MPa aos 90 dias, atingindo um valor equivalente ao microconcreto MR. O MRF12 atingiu 5,88 MPa aos 90 dias, superando o valor obtido aos 28 dias, mas ainda 36,50% inferior ao MR, evidenciando possíveis falhas na dispersão das fibras híbridas e ausência de sinergia entre as micro e macrofibras. Além disso, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os microconcretos MN, MRF1 e MRF2 nas idades de 28 e 90 dias, indicando que, apesar das variações no tipo de agregado, nos mecanismos de reforço e nas diferentes idades de cura, esses compósitos apresentaram desempenhos equivalentes de resistência máxima à tração na flexão a quatro pontos. De maneira semelhante, também não houve diferença estatisticamente significativa entre os microconcretos MR e MRF2 aos 90 dias, sugerindo que, nessa idade de cura, a incorporação de macrofibras não resultou em incremento de resistência em relação ao microconcreto sem fibras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades reológicas no estado fresco e as propriedades mecânicas aos 28 e 90 dias de idade de microconcretos com agregado natural de rio, assim como a substituição total do agregado natural de rio por agregado reciclado de RCC sem e com a incorporação de fibras de aço. Além disso, nos microconcretos com reforços fibrosos foi analisada a distribuição das fibras a partir de imagens radiográficas das placas ensaiadas à tração na flexão a quatro pontos.

No que se refere aos ensaios reológicos no estado fresco, todas as misturas apresentaram propriedades necessárias para classificá-las como microconcretos autoadensáveis. Ao realizar o ensaio do tronco de cone de Abrams é possível afirmar que os espalhamentos de todas as misturas alcançaram a fluidez necessária mínima de 550 mm, além de não haver segregação ou exsudação das misturas na análise visual. Com relação aos tempos de escoamento, todas as misturas apresentaram viscosidade elevada, mesmo àquelas sem incorporação de fibras de aço. Quanto ao ensaio do anel J nas misturas com macrofibras (MRF2 e MRF12) é possível afirmar que a incorporação dessas fibras aumentou a restrição ao fluxo entre as armaduras. O mesmo ocorre no ensaio que determina a habilidade passante (caixa L), sendo as misturas MN, MR e MRF1 obtiveram uma razão H2/H1 maior que 0,80 enquanto as misturas MRF2 e MRF12 apresentaram bloqueamento, não atendendo os limites estabelecidos. Em relação ao funil V, as misturas apresentaram valores acima da faixa recomendada, principalmente as misturas MRF2 e MRF12, o que reflete o impacto do maior comprimento das fibras na viscosidade das misturas.

Os resultados de resistência à compressão axial, evidenciaram que todas as misturas apresentaram incremento de resistência com o avanço da idade de cura. No entanto, tanto aos 28 dias quanto aos 90 dias, os microconcretos com agregado reciclado de RCC apresentaram valores inferiores aos obtidos pelo microconcreto com agregado natural de rio (MN). Porém, ao comparar os microconcretos com agregado reciclado de RCC sem e com adição de fibras, o microconcreto MRF2 apresentou as maiores tensões à compressão axial em ambas as idades, seguido pelos microconcretos MR, MRF12 e MRF1, respectivamente. Esse resultado demonstra que a incorporação de macrofibras na mistura com agregado reciclado proporcionou ganhos de resistência, sobretudo aos 90 dias, quando os valores se equiparam aos obtidos pelo microconcreto MN. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os microconcretos MR e MRF2 aos 28 dias, entre os microconcretos MRF1 e MRF12 nas idades de 28 e 90 dias, e entre os MN e MRF2 aos 90 dias.

Os resultados de resistência à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos com agregado reciclado de RCC reforçado com micro e macrofibras (MRF1 e MRF2) evidenciaram valores superiores em comparação ao microconcreto com agregado de RCC sem fibras (MR) e, principalmente, em relação ao microconcreto reforçado com fibras híbridas (MRF12). No entanto, esses valores foram equivalentes aos obtidos pelo microconcreto com agregado natural de rio (MN), tanto aos 28 dias quanto aos 90 dias de cura. Além disso, foi possível observar, principalmente aos 90 dias, uma melhora na interface fibra-matriz, possivelmente associada à evolução microestrutural dos microconcretos contendo agregado reciclado, resultando em um comportamento mais estável e maior tenacidade. Com relação à análise estatística, não foram observadas diferenças significativas entre os microconcretos MN, MRF1 e MRF2 nas duas idades avaliadas, o que indica que, apesar das diferenças no tipo de agregado, nos mecanismos de reforço e no tempo de cura, esses microconcretos apresentaram desempenhos semelhantes quanto à resistência máxima a tração na flexão. De modo semelhante, também não se verificou diferença estatisticamente significativa entre os microconcretos MR e MRF2 aos 90 dias, sugerindo que, nessa idade de cura, a adição de macrofibras não promoveu acréscimo efetivo na resistência em comparação ao microconcreto com agregado reciclado sem fibras.

Ao correlacionar os resultados de resistência à tração na flexão a quatro pontos com as imagens radiográficas, foi possível identificar uma concentração de tensões em regiões com menor densidade de fibras, além da presença de fibras desalinhadas ou orientadas em sentido contrário às tensões principais. Observou-se, ainda, que o processo de moldagem influenciou de forma significativa a distribuição das fibras, o que contribuiu para a elevada variabilidade observada nos resultados dos ensaios de flexão.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise das propriedades reológicas no estado fresco e das propriedades mecânicas dos microconcretos produzidos com agregado reciclado de RCC, sem e com a incorporação de microfibras e macrofibras de aço, demonstrou ser um tema de elevada complexidade e relevância para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis na construção civil. Neste contexto, é necessário a realização de estudos complementares que possibilitem uma compreensão mais aprofundada dos comportamentos observados, além do aprimoramento e a validação dos resultados obtidos neste trabalho. Dessa forma, propõem-se as seguintes sugestões para a continuidade deste trabalho:

- Investigar a influência de diferentes tipos de agregados reciclados, faixas granulométricas e frações de substituição do agregado natural por agregado reciclado nas propriedades reológicas e mecânicas dos microconcretos;
- Avaliar diferentes proporções de microfibras e macrofibras em microconcretos com agregado reciclado de RCC;
- Dosar e caracterizar microconcretos com relação $a/c \geq 0,20$;
- Avaliar a viabilidade do uso dos microconcretos em ambientes agressivos, através dos ensaios de durabilidade, como resistência à carbonatação, penetração de íons cloreto e ciclos de congelamento e descongelamento;
- Analisar as gravações dos ensaios mecânicos dos microconcretos, utilizando o software GOM Correlate, com objetivo de determinar o módulo de elasticidade e as deformações dos microconcretos produzidos durante os ensaios;
- Avaliar as composições definidas utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) por meio do software MEC, visando a otimização do empacotamento granular das misturas;
- Realizar as caracterizações microestruturais dos compósitos cimentícios utilizando MEV e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) com foco na interface matriz-agregado reciclado e matriz-fibra;
- Analisar a quantidade e a orientação das fibras de aço no terço médio das placas;
- Realizar ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão em água, para avaliar o comportamento dos microconcretos em relação à penetração de fluidos.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. **NBR 13278**, 2005. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. **NBR 9479**, 2006. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- _____. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. **NBR 12142**, 2010. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. Materiais pozolânicos – Requisitos. **NBR 12653**, 2014. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- _____. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. **NBR 16605**, 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. **NBR 15823-2**, 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. **NBR 15823-3**, 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. **NBR 15823-4**, 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. **NBR 15823-5**, 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **NBR 5739**, 2018. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- _____. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de caracterização. **NBR 11768-3**, 2019. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. **NBR 7215**, 2019. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. **NBR 15530**, 2019. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- _____. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. **NBR 16916**, 2021. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. **NBR 15116**, 2021. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. **NBR 17054**, 2022. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. **NBR 6118**, 2023. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>> Acesso em: 2 fev. 2025.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000.

AKONO, A.; ZHAN, M.; CHEN, J.; SHAH, S. P. Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103827.

ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; DE BRITO, J.; CORREIA, J. R. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. 167 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASTRA FIBRAS METÁLICAS. **Nossos produtos**. 2014. Disponível em: <<http://www.astrafibras.com.br/produtos.html>> Acesso em: 2 set. 2024.

BARBUDO, A.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M.; AGRELA, F. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.022.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Modern Concrete Technology Series. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n.º 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União: Seção 1**, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em:

<https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305> Acesso em: 5 jan. 2025.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União: Seção 1**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em:

<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.> Acesso em: 6 jan. 2025.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. **Construction and Building Materials**, v. 153, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.103.

CAMPOS, P. E. F. **Da Argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**. 208 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – USP, São Paulo, 2002.

CARNIO, M. A. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. **Concreto e Construções**, São Paulo, ed. 87, p. 26-32, 2017.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.045.

DA SILVA, R. V.; BACARJI, E.; CASCUDO, O. Mapeamento literário sobre o microconcreto. **Revista eletrônica de Engenharia Civil**. v. 15, n. 1, p. 1-16, 2019.

DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. **Modern Concrete Technology Series**, v. 9. London: E&FN SPON, 1999.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fiber reinforced concrete: new design perspectives. **Material and Structures**, v. 42, p. 1261-1281, 2009.

DIXON, D. E.; *et al.* Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). **ACI Committee 211**, p. 1-38, 2002.

EL-SEIDY, E.; CHOUGAN, M.; SAMBUCCI, M.; AL-KHEETAN, M. J.; ILARIO, B.; VALENTE, M.; GHAFAR, S. H. Lightweight alkali-activated materials and ordinary Portland cement composites using recycled polyvinyl chloride and waste glass aggregates to fully replace natural sand. **Construction and Building Materials**, v. 368, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130399.

ETXEBERRIA, M.; VEGAS, I. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, 2015. DOI: 10.1680/macr.14.00208.

EUROPEAN FEDERATION OF NATIONAL ASSOCIATIONS REPRESENTING PRODUCERS AND APPLICATORS OF SPECIALIST BUILDING PRODUCTS FOR

CONCRETE. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Surrey, UK: EFNARC, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. **EN 12390-3**, 2019. Brussels: CEN, 2019.

FENG, Q.; YAMAMOTO, H.; OKUBO, S.; MACHI, S. Characterization of fly ash with XRD and its pozzolanic reactivity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 9, p. 1317-1321, 2011.

FERREIRA, R. L. S. **Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRN, Natal, 2017.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, J. E. S.; FONSECA, N. J. M.; NÓBREGA, A. K. C. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (< 150 μm) do agregado reciclado de RCC. **Cerâmica**, v. 65, 2019. DOI: 10.1590/0366-69132019653732453.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 256 f. Tese (Livre-docência) – USP, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using Slump and Ve-Be test. **Materials Research**, v. 18, 2015. DOI: 10.1590/1516-1439.022915.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 285 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; BARROQUEIRO, T.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J.; DE BELIE, N.; MORÁN-DEL POZO, J.; JUAN-VALDÉS, A. Fracture energy of coarse recycled aggregate concrete using the wedge splitting test method: influence of water-reducing admixtures. **Materials and Structures**, v. 50, 2017. DOI: 10.1617/s11527-016-0989-z.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; RODRÍGUEZ-ROBLES, D.; JUAN-VALDÉS, A.; MORÁN-DEL POZO, J. M.; GUERRA-ROMERO, M. I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. **Materials**, v. 7, 2014. DOI: 10.3390/ma7096224.

JANSSON, R. **Material properties related to fire spalling of concrete**. 2008. 121 f. [Licentiate Thesis, Division of Building Materials]. Division of Building Materials, LTH, Lund University.

- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Reciclar para Construir: alternativas de Gestão do Resíduo de Gesso**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- KIM, J.; NCIRI, N.; SICA KOVA, A.; KIM N. Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements. **Construction and Building Materials**, v. 398, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132525.
- LIAO, L.; DE LA FUENTE, A.; CAVALARO, S., AGUADO, A. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 47, p. 200-210. 2015.
- MATIAS, D.; DE BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000961.
- MC-BAUCHEMIE BRASIL. **Ficha técnica MC-PowerFlow 4001**. 2022. Disponível em: <https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%204001.pdf> Acesso em: 01 jul. 2025.
- MEHTA, P. K. Rice husk ash – a unique supplementary cementing material. In: MALHOTRA, V. M. (ed.). **Advances in Concrete Technology**. SP-132. Detroit: ACI, 1992. p. 407-430.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- OLIVEIRA, M. E. D.; CABRAL, A. E. B. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil. **Engenharia Civil UM**, v. 41, p. 21-34, 2011.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Assembleia Geral das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- OSSIO, F.; SALINAS, C.; HERNÁNDEZ, H. Circular economy in the built environment: a systematic literature review and definition of the circular construction concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 414 DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137738.
- PASSOS, L.; MORENO JR., A. L.; SOUZA, A. A. A. Lightweight concrete with coarse aggregate from ceramic waste at high temperatures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 2, p. 410-414, 2020. DOI: 10.1590/S1983-41952020000200012.
- PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete

aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, 2012. DOI:

10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 150 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – UFMG, Belo Horizonte, 2010.

RAJAMANE, N. P.; NAIDU, S. V.; MURTHY, A. R. Use of rice husk ash in concrete: Review. **Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 12, p. 41-48, 2014. DOI: 10.33448/rsd-v10i3.12970

RAMBO, D. A. S. **Concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço híbridas: aspectos materiais e estruturais**. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

RAMBO, D. A. S.; SILVA, F. de A.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of steel fiber hybridization on the fracture behavior of self-consolidating concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 54, p. 100-109, 2014. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.02.004.

RICHARDSON, A.; COVENTRY, K.; LANDLESS, S. Synthetic and steel fibres – a comparative study. **Journal Concrete**, 2009.

SELISTRE, S. L. C. **Análise teórico-experimental de uma laje nervurada de microconcreto armado submetida a um carregamento uniformemente distribuído**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2000.

SILVA NETO, G. A.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. **Ambiente Construído**, v. 18, 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000200242.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Evaluating the performance of self-compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non-destructive testing techniques.

International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, v. 181, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.039.

SOSA, M. E.; ETCHEVERRY, J. M.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A.; ZEGA, C. J.

Mechanical and microstructural properties of mortar with fine recycled aggregates. **Materials Today: Proceedings**, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.148.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

WU, Z.; LI, Q.; XU, F.; YU, Q. Numerical investigation on flexural behavior of steel fiber reinforced concrete using XFEM. **Materials**, v. 15, n. 20, p. 7146, 2022. DOI:

10.3390/ma15207146.

ANEXOS

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados das análises de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com nível de 95% ($\alpha = 0,05$), referentes aos ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração na flexão a quatro pontos, respectivamente.

Tabela 14 – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), referentes ao ensaio de resistência à compressão axial dos microconcretos

ANOVA TwoWay (25/07/2025 13:28:31)

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

| Microconcreto | | | | | | | |
|---------------|---|-----------|----------|---------|-----------|---------|------------|
| | N | Mean | SD | SEM | Variance | Missing | NonMissing |
| MN | 8 | 115,47 | 3,70098 | 1,3085 | 13,69729 | 0 | 8 |
| MR | 8 | 96,69875 | 6,03992 | 2,13543 | 36,48064 | 0 | 8 |
| MRF1 | 8 | 80,41 | 5,02441 | 1,7764 | 25,24469 | 0 | 8 |
| MRF2 | 8 | 106,22625 | 10,77983 | 3,81124 | 116,20466 | 0 | 8 |
| MRF12 | 8 | 84,40625 | 5,49605 | 1,94315 | 30,2066 | 0 | 8 |

| Idade de cura | | | | | | | |
|---------------|----|---------|----------|---------|-----------|---------|------------|
| | N | Mean | SD | SEM | Variance | Missing | NonMissing |
| 28 dias | 20 | 91,4185 | 13,22412 | 2,957 | 174,87745 | 0 | 20 |
| 90 dias | 20 | 101,866 | 14,53676 | 3,25052 | 211,31745 | 0 | 20 |

ANOVA

Overall ANOVA

| | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | P Value |
|-----------------|----|----------------|-------------|-----------|-------------|
| Microconcreto | 4 | 6876,36843 | 1719,09211 | 232,81562 | 4,031E-22 |
| Idade de cura | 1 | 1091,50256 | 1091,50256 | 147,82154 | 4,01997E-13 |
| Interaction | 4 | 239,81687 | 59,95422 | 8,11956 | 1,463E-4 |
| Model | 9 | 8207,68787 | 911,96532 | 123,50692 | 3,28949E-21 |
| Error | 30 | 221,51762 | 7,38392 | -- | -- |
| Corrected Total | 39 | 8429,2055 | -- | -- | -- |

At the 0.05 level, the population means of Microconcreto are significantly different.
 At the 0.05 level, the population means of Idade de cura are significantly different.
 At the 0.05 level, the interaction between Microconcreto and Idade de cura is significant.

Means Comparisons

Tukey Test

| Microconcreto | Idade de cura | Microconcreto | Idade de cura | MeanDiff | SEM | q Value | Prob | Alpha | Sig | LCL | UCL |
|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|---------|----------|------------|-------|-----|-----------|-----------|
| MN | 90 dias | MN | 28 dias | 5,815 | 1,92145 | 4,27993 | 0,11604 | 0,05 | 0 | -0,73942 | 12,36942 |
| MR | 28 dias | MN | 28 dias | -21,02 | 1,92145 | 15,47103 | 2,32357E-8 | 0,05 | 1 | -27,57442 | -14,46558 |
| MR | 28 dias | MN | 90 dias | -26,835 | 1,92145 | 19,75095 | 7,13039E-8 | 0,05 | 1 | -33,38942 | -20,28058 |
| MR | 90 dias | MN | 28 dias | -10,7075 | 1,92145 | 7,88088 | 1,76163E-4 | 0,05 | 1 | -17,26192 | -4,15308 |
| MR | 90 dias | MN | 90 dias | -16,5225 | 1,92145 | 12,1608 | 6,97969E-8 | 0,05 | 1 | -23,07692 | -9,96808 |
| MR | 90 dias | MR | 28 dias | 10,3125 | 1,92145 | 7,59015 | 3,09887E-4 | 0,05 | 1 | 3,75808 | 16,86692 |
| MRF1 | 28 dias | MN | 28 dias | -35,745 | 1,92145 | 26,30884 | 1,09954E-8 | 0,05 | 1 | -42,29942 | -29,19058 |
| MRF1 | 28 dias | MN | 90 dias | -41,56 | 1,92145 | 30,58877 | 0 | 0,05 | 1 | -48,11442 | -35,00558 |
| MRF1 | 28 dias | MR | 28 dias | -14,725 | 1,92145 | 10,83782 | 6,11243E-7 | 0,05 | 1 | -21,27942 | -8,17058 |
| MRF1 | 28 dias | MR | 90 dias | -25,0375 | 1,92145 | 18,42797 | 3,10485E-8 | 0,05 | 1 | -31,59192 | -18,48308 |
| MRF1 | 90 dias | MN | 28 dias | -28,56 | 1,92145 | 21,02058 | 7,43526E-8 | 0,05 | 1 | -35,11442 | -22,00558 |
| MRF1 | 90 dias | MN | 90 dias | -34,375 | 1,92145 | 25,3005 | 8,1704E-8 | 0,05 | 1 | -40,92942 | -27,82058 |
| MRF1 | 90 dias | MR | 28 dias | -7,54 | 1,92145 | 5,54955 | 0,01449 | 0,05 | 1 | -14,09442 | -0,98558 |
| MRF1 | 90 dias | MR | 90 dias | -17,8525 | 1,92145 | 13,1397 | 5,5302E-8 | 0,05 | 1 | -24,40692 | -11,29808 |
| MRF1 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | 7,185 | 1,92145 | 5,28827 | 0,02292 | 0,05 | 1 | 0,63058 | 13,73942 |
| MRF2 | 28 dias | MN | 28 dias | -16,2025 | 1,92145 | 11,92528 | 2,19399E-7 | 0,05 | 1 | -22,75692 | -9,64808 |
| MRF2 | 28 dias | MN | 90 dias | -22,0175 | 1,92145 | 16,2052 | 3,711E-8 | 0,05 | 1 | -28,57192 | -15,46308 |
| MRF2 | 28 dias | MR | 28 dias | 4,8175 | 1,92145 | 3,54575 | 0,30465 | 0,05 | 0 | -1,73692 | 11,37192 |
| MRF2 | 28 dias | MR | 90 dias | -5,495 | 1,92145 | 4,0444 | 0,16203 | 0,05 | 0 | -12,09442 | 1,05942 |
| MRF2 | 28 dias | MRF1 | 28 dias | 19,5425 | 1,92145 | 14,38357 | 3,73986E-8 | 0,05 | 1 | 12,98808 | 26,09592 |
| MRF2 | 28 dias | MRF1 | 90 dias | 12,3575 | 1,92145 | 9,0953 | 1,67257E-5 | 0,05 | 1 | 5,80308 | 18,91192 |
| MRF2 | 90 dias | MN | 28 dias | 3,53 | 1,92145 | 2,59813 | 0,70781 | 0,05 | 0 | -3,02442 | 10,08442 |
| MRF2 | 90 dias | MN | 90 dias | -2,285 | 1,92145 | 1,68179 | 0,96851 | 0,05 | 0 | -8,83942 | 4,26942 |
| MRF2 | 90 dias | MR | 28 dias | 24,55 | 1,92145 | 18,06916 | 3,20068E-8 | 0,05 | 1 | 17,99558 | 31,10442 |
| MRF2 | 90 dias | MR | 90 dias | 14,2375 | 1,92145 | 10,47901 | 1,19044E-8 | 0,05 | 1 | 7,68308 | 20,79192 |
| MRF2 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | 39,275 | 1,92145 | 28,90698 | 1,41658E-9 | 0,05 | 1 | 32,7058 | 45,82942 |
| MRF2 | 90 dias | MRF1 | 90 dias | 32,09 | 1,92145 | 23,61871 | 1,5221E-8 | 0,05 | 1 | 25,53558 | 38,64442 |
| MRF2 | 90 dias | MRF2 | 28 dias | 19,7325 | 1,92145 | 14,52341 | 3,46898E-8 | 0,05 | 1 | 13,17808 | 26,28692 |
| MRF12 | 28 dias | MN | 28 dias | -32,7525 | 1,92145 | 24,10632 | 2,37036E-7 | 0,05 | 1 | -39,30692 | -26,19808 |
| MRF12 | 28 dias | MN | 90 dias | -38,5675 | 1,92145 | 28,38625 | 5,93245E-9 | 0,05 | 1 | -45,12192 | -32,01308 |
| MRF12 | 28 dias | MR | 28 dias | -11,7325 | 1,92145 | 8,63529 | 4,06973E-5 | 0,05 | 1 | -18,28692 | -5,17808 |
| MRF12 | 28 dias | MR | 90 dias | -22,045 | 1,92145 | 16,22544 | 3,70517E-8 | 0,05 | 1 | -28,59942 | -15,49058 |
| MRF12 | 28 dias | MRF1 | 28 dias | 2,9925 | 1,92145 | 2,20252 | 0,85745 | 0,05 | 0 | -3,56192 | 9,54692 |
| MRF12 | 28 dias | MRF1 | 90 dias | -4,1925 | 1,92145 | 3,08574 | 0,48943 | 0,05 | 0 | -10,74692 | 2,36192 |
| MRF12 | 28 dias | MRF2 | 28 dias | -16,55 | 1,92145 | 12,18104 | 6,7799E-8 | 0,05 | 1 | -23,10442 | -9,99558 |
| MRF12 | 28 dias | MRF2 | 90 dias | -36,2825 | 1,92145 | 26,70445 | 1,00252E-8 | 0,05 | 1 | -42,83692 | -29,72808 |
| MRF12 | 90 dias | MN | 28 dias | -23,56 | 1,92145 | 17,34051 | 3,39752E-8 | 0,05 | 1 | -30,11442 | -17,00558 |
| MRF12 | 90 dias | MN | 90 dias | -29,375 | 1,92145 | 21,82043 | 2,05242E-7 | 0,05 | 1 | -35,92942 | -22,82058 |
| MRF12 | 90 dias | MR | 28 dias | -2,54 | 1,92145 | 1,86948 | 0,84044 | 0,05 | 0 | -8,09442 | 4,01442 |
| MRF12 | 90 dias | MR | 90 dias | -12,8525 | 1,92145 | 9,45963 | 8,3056E-8 | 0,05 | 1 | -19,40692 | -6,28808 |
| MRF12 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | 12,185 | 1,92145 | 8,96834 | 2,13671E-5 | 0,05 | 1 | 5,63058 | 18,73942 |
| MRF12 | 90 dias | MRF1 | 90 dias | 5 | 1,92145 | 3,88007 | 0,25986 | 0,05 | 0 | -1,55442 | 11,55442 |
| MRF12 | 90 dias | MRF2 | 28 dias | -7,3575 | 1,92145 | 5,41523 | 0,01837 | 0,05 | 1 | -13,91192 | -0,80308 |
| MRF12 | 90 dias | MRF2 | 90 dias | -27,09 | 1,92145 | 19,93864 | 7,17816E-8 | 0,05 | 1 | -33,64442 | -20,53558 |
| MRF12 | 90 dias | MRF12 | 28 dias | 9,1925 | 1,92145 | 6,76581 | 0,00152 | 0,05 | 1 | 2,63808 | 15,74692 |

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 15 – Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, com nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), referentes ao ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos dos microconcretos

ANOVA:TwoWay (25/07/2025 13:43:58)

Notes

Input Data

Descriptive Statistics

| Microconcreto | N | Mean | SD | SEM | Variance | Missing | NonMissing |
|---------------|---|----------|---------|---------|----------|---------|------------|
| MN | 8 | 10,84125 | 0,75372 | 0,26548 | 0,5681 | 0 | 8 |
| MR | 8 | 8,7575 | 0,78935 | 0,27908 | 0,62308 | 0 | 8 |
| MRF1 | 5 | 11,5 | 0,82408 | 0,36854 | 0,6791 | 0 | 5 |
| MRF2 | 8 | 10,4525 | 1,12862 | 0,39903 | 1,27379 | 0 | 8 |
| MRF12 | 6 | 5,18167 | 0,99841 | 0,4076 | 0,99682 | 0 | 6 |

Idade de cura

| Idade de cura | N | Mean | SD | SEM | Variance | Missing | NonMissing |
|---------------|----|---------|---------|---------|----------|---------|------------|
| 28 dias | 18 | 9,21 | 2,51009 | 0,59163 | 6,30056 | 0 | 18 |
| 90 dias | 17 | 9,60118 | 2,15212 | 0,52197 | 4,63162 | 0 | 17 |

ANOVA

Overall ANOVA

| | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Value | P Value |
|-----------------|----|----------------|-------------|----------|-------------|
| Microconcreto | 4 | 157,15231 | 39,28808 | 66,80612 | 5,58837E-13 |
| Idade de cura | 1 | 2,37482 | 2,37482 | 4,03818 | 0,05539 |
| Interaction | 4 | 7,95634 | 1,98909 | 3,38227 | 0,02418 |
| Model | 9 | 167,85112 | 18,65012 | 31,71299 | 1,69451E-11 |
| Error | 25 | 14,70228 | 0,58809 | | |
| Corrected Total | 34 | 182,5534 | | | |

At the 0.05 level, the population means of Microconcreto are significantly different.
 At the 0.05 level, the population means of Idade de cura are not significantly different.
 At the 0.05 level, the interaction between Microconcreto and Idade de cura is significant.

Means Comparisons

Tukey Test

| Microconcreto | Idade de cura | Microconcreto | Idade de cura | MeanDiff | SEM | q Value | Prob | Alpha | Sig | LCL | UCL |
|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|---------|----------|------------|-------|-----|----------|----------|
| MN | 90 dias | MN | 28 dias | 1,1725 | 0,54226 | 3,05788 | 0,50501 | 0,05 | 0 | -0,70515 | 3,05015 |
| MR | 28 dias | MN | 28 dias | -2,0025 | 0,54226 | 5,22252 | 0,02993 | 0,05 | 1 | -3,88015 | -0,12485 |
| MR | 28 dias | MN | 90 dias | -3,175 | 0,54226 | 8,2804 | 1,53536E-4 | 0,05 | 1 | -5,05265 | -1,29735 |
| MR | 90 dias | MN | 28 dias | -0,9925 | 0,54226 | 2,58844 | 0,71138 | 0,05 | 0 | -2,87015 | 0,88515 |
| MR | 90 dias | MN | 90 dias | -2,165 | 0,54226 | 5,64632 | 0,01495 | 0,05 | 1 | -4,04265 | -0,28735 |
| MR | 90 dias | MR | 28 dias | 1,01 | 0,54226 | 2,63408 | 0,69198 | 0,05 | 0 | -0,86765 | 2,89765 |
| MRF1 | 28 dias | MN | 28 dias | 1,15833 | 0,58571 | 2,79684 | 0,62072 | 0,05 | 0 | -0,86976 | 3,18643 |
| MRF1 | 28 dias | MN | 90 dias | -0,01417 | 0,58571 | 0,03421 | 1 | 0,05 | 0 | -2,04226 | 2,01393 |
| MRF1 | 28 dias | MR | 28 dias | 3,16083 | 0,58571 | 7,63196 | 4,79E-4 | 0,05 | 1 | 1,13274 | 5,18893 |
| MRF1 | 28 dias | MR | 90 dias | 2,15083 | 0,58571 | 5,19327 | 0,03136 | 0,05 | 1 | 0,12274 | 4,17893 |
| MRF1 | 90 dias | MN | 28 dias | 1,375 | 0,66413 | 2,92796 | 0,56233 | 0,05 | 0 | -0,92464 | 3,67464 |
| MRF1 | 90 dias | MN | 90 dias | 0,2025 | 0,66413 | 0,43121 | 1 | 0,05 | 0 | -2,09714 | 2,50214 |
| MRF1 | 90 dias | MR | 28 dias | 3,3775 | 0,66413 | 7,19213 | 0,00104 | 0,05 | 1 | 1,07786 | 5,67714 |
| MRF1 | 90 dias | MR | 90 dias | 2,3675 | 0,66413 | 5,04141 | 0,03991 | 0,05 | 1 | 0,06786 | 4,66714 |
| MRF1 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | 0,21667 | 0,70005 | 0,4377 | 1 | 0,05 | 0 | -2,20737 | 2,6407 |
| MRF2 | 28 dias | MN | 28 dias | 0,7575 | 0,54226 | 1,97556 | 0,917 | 0,05 | 0 | -1,12015 | 2,63515 |
| MRF2 | 28 dias | MN | 90 dias | -0,415 | 0,54226 | 1,08232 | 0,99853 | 0,05 | 0 | -2,29265 | 1,46265 |
| MRF2 | 28 dias | MR | 28 dias | 2,76 | 0,54226 | 7,19808 | 0,00103 | 0,05 | 1 | 0,88235 | 4,63765 |
| MRF2 | 28 dias | MR | 90 dias | 1,75 | 0,54226 | 4,564 | 0,08258 | 0,05 | 0 | -0,12765 | 3,62765 |
| MRF2 | 28 dias | MRF1 | 28 dias | -0,40083 | 0,58571 | 0,96783 | 0,99938 | 0,05 | 0 | -2,42893 | 1,62726 |
| MRF2 | 28 dias | MRF1 | 90 dias | -0,6175 | 0,66413 | 1,31492 | 0,99373 | 0,05 | 0 | -2,91714 | 1,68214 |
| MRF2 | 90 dias | MN | 28 dias | -0,3625 | 0,54226 | 0,9454 | 0,99949 | 0,05 | 0 | -2,24015 | 1,51515 |
| MRF2 | 90 dias | MN | 90 dias | -1,535 | 0,54226 | 4,00328 | 0,17954 | 0,05 | 0 | -3,41265 | 0,34265 |
| MRF2 | 90 dias | MR | 28 dias | 1,64 | 0,54226 | 4,27712 | 0,12436 | 0,05 | 0 | -0,23765 | 3,51765 |
| MRF2 | 90 dias | MR | 90 dias | 0,63 | 0,54226 | 1,64304 | 0,97184 | 0,05 | 0 | -1,24765 | 2,50765 |
| MRF2 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | -1,52083 | 0,58571 | 3,67211 | 0,2699 | 0,05 | 0 | -3,54893 | 0,50726 |
| MRF2 | 90 dias | MRF1 | 90 dias | -1,7375 | 0,66413 | 3,69987 | 0,26127 | 0,05 | 0 | -4,03714 | 0,56214 |
| MRF2 | 90 dias | MRF2 | 28 dias | -1,12 | 0,54226 | 2,92096 | 0,56544 | 0,05 | 0 | -2,99765 | 0,75765 |
| MRF12 | 28 dias | MN | 28 dias | -5,76833 | 0,58571 | 13,92787 | 7,37853E-8 | 0,05 | 1 | -7,79643 | -3,74024 |
| MRF12 | 28 dias | MN | 90 dias | -6,94083 | 0,58571 | 16,75892 | 5,91236E-8 | 0,05 | 1 | -8,96893 | -4,91274 |
| MRF12 | 28 dias | MR | 28 dias | -3,76583 | 0,58571 | 9,09275 | 3,7465E-5 | 0,05 | 1 | -5,79393 | -1,73774 |
| MRF12 | 28 dias | MR | 90 dias | -4,77583 | 0,58571 | 11,53144 | 6,78413E-7 | 0,05 | 1 | -6,80393 | -2,74774 |
| MRF12 | 28 dias | MRF1 | 28 dias | -6,92667 | 0,62615 | 15,64453 | 6,04087E-8 | 0,05 | 1 | -9,09479 | -4,75854 |
| MRF12 | 28 dias | MRF1 | 90 dias | -7,14333 | 0,70005 | 14,4306 | 8,28814E-8 | 0,05 | 1 | -9,56737 | -4,7193 |
| MRF12 | 28 dias | MRF2 | 28 dias | -6,52583 | 0,58571 | 15,75688 | 6,01721E-8 | 0,05 | 1 | -8,55393 | -4,49774 |
| MRF12 | 28 dias | MRF2 | 90 dias | -5,40583 | 0,58571 | 13,0526 | 7,50455E-8 | 0,05 | 1 | -7,43393 | -3,37774 |
| MRF12 | 90 dias | MN | 28 dias | -4,37833 | 0,58571 | 10,57166 | 3,11719E-6 | 0,05 | 1 | -6,40643 | -2,35024 |
| MRF12 | 90 dias | MN | 90 dias | -5,55083 | 0,58571 | 13,40271 | 4,88623E-8 | 0,05 | 1 | -7,57893 | -3,52274 |
| MRF12 | 90 dias | MR | 28 dias | -2,37583 | 0,58571 | 5,73654 | 0,01286 | 0,05 | 1 | -4,40393 | -0,34774 |
| MRF12 | 90 dias | MR | 90 dias | -3,38583 | 0,58571 | 8,17523 | 1,84572E-4 | 0,05 | 1 | -5,41393 | -1,35774 |
| MRF12 | 90 dias | MRF1 | 28 dias | -5,53667 | 0,62615 | 12,50509 | 1,80846E-7 | 0,05 | 1 | -7,70479 | -3,36854 |
| MRF12 | 90 dias | MRF1 | 90 dias | -5,75333 | 0,70005 | 11,62259 | 5,9125E-7 | 0,05 | 1 | -8,17737 | -3,3293 |
| MRF12 | 90 dias | MRF2 | 28 dias | -5,13583 | 0,58571 | 12,40067 | 2,04096E-7 | 0,05 | 1 | -7,16393 | -3,10774 |
| MRF12 | 90 dias | MRF2 | 90 dias | -4,01583 | 0,58571 | 9,69639 | 1,3333E-5 | 0,05 | 1 | -6,04393 | -1,98774 |
| MRF12 | 90 dias | MRF12 | 28 dias | 1,39 | 0,62615 | 3,13945 | 0,46981 | 0,05 | 0 | -0,77812 | 3,55812 |

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Fonte: Elaboração própria.