

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

TAYARA PERONIO GUERIM

**DESEMPENHO REOLÓGICO E MECÂNICO DO MICROCONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM O USO DE RCD REFORÇADO COM FIBRAS
METÁLICAS**

**Alegrete
2024**

TAYARA PERONIO GUERIM

**DESEMPENHO REOLÓGICO E MECÂNICO DO MICROCONCRETO
AUTOADENSÁVEL COM O USO DE RCD REFORÇADO COM FIBRAS
METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Ederli Marangon

Coorientador: Rubens Silveira Meichtry

**Alegrete
2024**

TAYARA PERONIO GUERIM

**DESEMPENHO REOLÓGICO E MECÂNICO DO MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL
COM O USO DE RCD REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharela em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. EDERLI MARANGON - UNIPAMPA - Orientador

Eng. RUBENS SILVEIRA MEICHTRY - Examinador Externo - Coorientador

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Eng. Me. WAGNER DAMBROS FERNANDES - Avaliador Externo



Assinado eletronicamente por **WAGNER DAMBROS FERNANDES, Usuário Externo**, em 16/07/2024, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rubens Silveira Meichtry, Usuário Externo**, em 16/07/2024, às 12:58, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/07/2024, às 23:36, 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 **1492120** e o código CRC **B154ED62**.

Dedico este trabalho aos meus pais, João Luís Guerim e Marta P. Guerim, que sempre me apoiaram para a realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre me deu forças para seguir atrás dos meus sonhos e nunca me deixou desistir. Sem Ele nada seria possível. Aos meus pais, João Luís Guerim e Marta P. Guerim que são os maiores amores que possuo em vida, pelo apoio infundável em todos os quesitos. Ao restante da minha família, tios, tias e avós, que sempre se mostraram dispostos em me ajudar de alguma forma e a acreditar que meus sonhos são possíveis.

Ao meu companheiro de todas as horas, Gohan, que se tornou a minha família e que em muitos momentos me deu força emocional para seguir em frente.

Aos meus amigos(as), Eduarda Schein, Nicoli Tura, João Vitor Sarturi, Luan Garcia, Enzo Bitencurt, Otávio Nemitz, Ingrid Teixeira, Juliano Neto, Ronald Assunção, Samuel Walter, Jonathan Oliveira, Ian Mota, Robson Nery, Jaime Neto, Stefano Alves, Liliane Carvalho, Airton Peronio, Guilherme Weber, Vinicius Betim, Gabriela Mota e Ricardo Habi, que nunca deixaram de apostar em mim e me incentivar de várias formas, desde as noites de estudos até aos inúmeros acompanhamentos em laboratório para a realização desse trabalho.

Agradeço, em especial, ao meu amigo e coorientador Rubens Silveira Meichtry que se mostrou totalmente compreensivo e disposto em ajudar para que esse sonho se tornasse realidade, sendo uma peça fundamental para que tudo ocorresse bem. Foi um prazer ser a tua primeira coorientanda e conviver de forma direta, por mais de dois semestres pesquisando ao teu lado, meu amigo.

Aos meus professores que de uma forma ou outra colaboraram e transmitiram seus conhecimentos para que o título de Bacharel em Engenharia Civil seja alcançado, em especial ao meu orientador, Professor Dr. Ederli Marangon, que se mostrou totalmente dedicado e disposto, sendo um ótimo profissional, exercendo a sua função de forma clara e eficiente.

Aos amores que tive nesse processo de crescimento profissional e pessoal e a todos que de uma forma direta ou indireta serviram de inspiração e motivação para eu não desistir nas inúmeras dificuldades que apareceram no caminho.

As empresas apoiadoras deste trabalho, Rosário Postes Ltda, Sílica Verde do Arroz, Soluções em Beneficiamento de Resíduos e Comercio Ltda, Astra Fibras Metálicas, Pozo Fly e Mc Bauchemie Brasil, que forneceram os materiais

necessários para a realização do mesmo. Ao Setor de Imagem do Hospital de Guarnição de Alegrete, pelas imagens de Raios – X fornecidas. E aos técnicos laboratoristas da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete, em especial aos do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção – LEMAC, Marcelo de Jesus e Raquel dos Santos Machado, por todo cuidado e tempo empregado nesta pesquisa.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar o desempenho reológico no estado fresco e mecânico no estado endurecido, de um microconcreto autoadensável com substituição total do agregado natural por RCD, além de uma mistura com 100% de agregado de RCD e com inclusão fibras metálicas, em comparação com um concreto de referência sem fibras metálicas. Para a caracterização da fluidez, viscosidade plástica e habilidade passante dos microconcretos autoadensáveis no estado fresco, foram realizados ensaios reológicos utilizando o cone de Abrams, funil V e caixa L. Para os ensaios mecânicos foram moldados corpos de prova cúbicos com dimensões de 100x100 mm e placas nas dimensões de 12x100x400 mm. Foram realizadas três misturas, sendo: a mistura de referência denominada de AN, a mistura de substituição de areia natural por areia de RCD denominada de ARCD e, por fim a mistura com substituição de areia natural por areia de RCD e inclusão de fibras denominada de ARCDF. Os resultados obtidos dos ensaios reológicos no estado fresco, foram condizentes com as características desse tipo de microconcreto. Os valores de espalhamentos obtidos foram maiores que 550 mm. Todos os microconcretos estudados apresentaram boa viscosidade sem apresentar exsudação ou segregação. Os resultados de resistência à compressão axial para as misturas com utilização de RCD foram menores comparado a mistura com utilização de areia natural. Nos resultados obtidos para a resistência à tração na flexão em quatro pontos, apesar de ter observado um aumento de resistência à tração média, a análise estatística com probabilidade de 95% resulta que não há diferença significativa entre as misturas estudadas. A avaliação do processo de fissuração foi realizada através do uso de correlações de imagens, pelo software GOM Correlate®. Além da análise de dispersão das fibras metálicas em uma amostra cúbica e uma placa submetidas a imagens de Raios – X. Os resultados obtidos demonstraram que há relação entre os métodos utilizados, e para as misturas contendo fibras foi possível avaliar a alta dispersão das curvas de tensão de tração na flexão x deslocamentos obtidos.

Palavras-Chave: Resíduos de construção e demolição; Concreto reciclável; Concreto autoadensável; Microconcreto autoadensável; Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The aim of this research was to analyze the rheological performance in the fresh state and the mechanical performance in the hardened state of a self-compacting microconcrete with total replacement of natural aggregate with CDW, as well as a mixture with 100% CDW aggregate and with the inclusion of metallic fibers, compared to a reference concrete without metallic fibers. To characterize the fluidity, plastic viscosity and passing ability of the self-compacting microconcrete in the fresh state, rheological tests were carried out using the Abrams cone, V funnel and L box. For the mechanical tests, cubic specimens with dimensions of 100x100 mm and plates with dimensions of 12x100x400 mm were cast. Three mixtures were made: the reference mixture called AN, the mixture replacing natural sand with CDW sand called ARCD and, finally, the mixture replacing natural sand with CDW sand and including fibers called ARCDF. The results obtained from the rheological tests in the fresh state were consistent with the characteristics of this type of microconcrete. The spread values obtained were greater than 550 mm. All the microconcretes studied showed good viscosity without exudation or segregation. The axial compressive strength results for the mixes using CDW were lower compared to the mixes using natural sand. In the results obtained for the four-point flexural tensile strength, although there was an increase in the average tensile strength, the statistical analysis with a probability of 95% shows that there is no significant difference between the mixtures studied. The cracking process was evaluated using image correlations, using the GOM Correlate® software. In addition to the analysis of the dispersion of the metal fibers in a cubic sample and a plate subjected to X-ray images. The results obtained showed that there is a relationship between the methods used, and for the mixtures containing fibers it was possible to evaluate the high dispersion of the tensile stress x displacement curves obtained.

Keywords: Construction and demolition waste; Recyclable concrete; Self-compacting concrete; Self-compacting microconcrete; Sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Agregados miúdos	26
Figura 2 – Separação de RCD para contagem de grãos	27
Figura 3 – Granulometria dos agregados miúdos	28
Figura 4 – Imagens de MEV	29
Figura 5 – Cimento Portland CP V-ARI	30
Figura 6 – Ensaio para determinação da massa específica	31
Figura 7 – Cinza Volante	31
Figura 8 – Sílica da casca de arroz	32
Figura 9 – Fibras metálicas	33
Figura 10 – Aditivo químico	34
Figura 11 – Areias de RCD na estufa para secagem	36
Figura 12 – Peneirador mecânico utilizado para obter as frações de AN e RCD utilizadas	36
Figura 13 – Fluxograma do procedimento experimental	38
Figura 14 – Cone de Abrams	40
Figura 15 – Índice de estabilidade visual	41
Figura 16 – Funil V	41
Figura 17 – Caixa L	42
Figura 18 – Máquina universal de ensaios Instron	43
Figura 19 – Esquematização do ensaio à tração na flexão em quatro pontos	44
Figura 20 – Segmentação nos cubos com fibras metálicas	45
Figura 21 – Placa segmentada na seção vertical da moldagem e corpo de prova sem sofrer alterações.....	46
Figura 22 – Processo de Raios - X em corpos de prova com fibras metálicas.....	46
Figura 23 – Imagem ao final do espalhamento – Cone de Abrams.....	48
Figura 24 – Imagem obtida durante a da execução do ensaio no Funil V.....	50
Figura 25 – Imagem obtida durante a execução do ensaio da Caixa L.....	52
Figura 26 – Comportamentos tensão x deslocamento dos ensaios de compressão axial nos cubos: (a) microconcreto AN, (b) microconcreto ARCD e (c) microconcreto ARCDF	53
Figura 27 – Curvas típicas de resistência à compressão X deslocamento das misturas AN, ARCD e ARCDF para comparação.....	55

Figura 28 – Modo de fratura à compressão axial nos cubos.....	57
Figura 29 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial mistura AN	58
Figura 30 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial da mistura ARCD	59
Figura 31 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial da mistura ARCDF	60
Figura 32 – Comportamentos de tensão x deslocamento da resistência à tração na flexão em 4 pontos dos microconcretos	61
Figura 33 – Processo de ensaio de tensão na flexão em 4 pontos e ruptura na placa da mistura AN.....	64
Figura 34 – Modo de ruptura na placa ARCD	64
Figura 35 – Modo de ruptura nas placas ARCDF.....	65
Figura 36 – Correlação de imagem da placa da mistura AN.....	66
Figura 37 – Correlação de imagem Placa ARCD	67
Figura 38 – Correlação das imagens do microconcreto contendo areia de RCD e fibras metálicas	68
Figura 39 – Imagens de raios - x dos corpos de prova cúbicos com fibras metálicas	70
Figura 40 – Imagem de raios - x da fração 2 da placa ARCDF	71
Figura 41 – Imagem de Raios - x vista vertical da placa ARCDF.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos agregados reciclados.....	27
Tabela 2 – Caracterização da areia natural e do RCD.....	28
Tabela 3 – Composição e teores da SCA	32
Tabela 4 – Composição química das fibras de aço.....	33
Tabela 5 – Características das fibras de aço	34
Tabela 6 – Traço otimizado de Formagini	35
Tabela 7 – Composição das misturas de microconcreto que foram produzidas: Mistura de Referência (AN); Mistura com substituição de areia natural por areia de RCD (ARCD) e Mistura com substituição de areia natural por areia de RCD e fibras metálicas (ARCDF)	37
Tabela 8 – Quantitativo das amostras para os ensaios mecânicos.....	38
Tabela 9 – Resultados obtidos no ensaio de cone de Abrams	47
Tabela 10 – Resultados obtidos dos tempos de fluidez no Funil V	49
Tabela 11 – Resultados encontrados no ensaio da Caixa L	51
Tabela 12 – Dados dos ensaios de compressão axial	54
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração na flexão em 4 pontos	63

LISTA DE ABREVIATURAS

AN – Areia natural

CV – Cinza volante

DIC – Digital Image Correlation

FA – Fibras de aço

IEV – Índice de estabilidade visual

LEMAC – Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção

MAEC – Materiais Aplicados na Engenharia Civil

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

RCD – Resíduos da Construção e Demolição

SBR – Soluções em Beneficiamento de Resíduos e Comércio Ltda.

SCA – Sílica da Casca de Arroz

SVA – Sílica Verde do Arroz®

T500 – Tempo de escoamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral.....	18
1.2	Objetivos específicos.....	18
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Concreto autoadensável (CAA).....	19
2.1.1	Microconcreto autoadensável.....	19
2.2	Resíduos da Construção e Demolição (RCD).....	20
2.3	Material compósito.....	21
2.4	Utilização de RCDs e fibras metálicas em concreto.....	22
2.5	Resistência à compressão axial do concreto autoadensável.....	23
2.6	Resistência à tração do concreto autoadensável.....	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Local de execução.....	25
3.2	Materiais.....	25
3.3	Caracterização dos materiais.....	25
3.3.1	Caracterização dos agregados miúdos.....	25
3.3.2	Cimento Portland e materiais pozolânicos.....	30
3.3.3	Fibras metálicas.....	33
3.3.3	Aditivo químico.....	34
3.4	Composição dos microconcretos.....	35
3.5	Procedimento experimental.....	37
3.5.1	Processo de execução das misturas.....	38
3.6	Ensaio reológicos e mecânicos nos microconcretos autoadensáveis.....	40
3.6.1	Ensaio de espalhamento cone de Abrams.....	40
3.6.2	Ensaio de tempo de escoamento no funil V.....	41
3.6.3	Ensaio da caixa L.....	42
3.6.4	Comportamento à compressão axial.....	43
3.6.5	Comportamento à tração na flexão em quatro pontos.....	44
3.7	Imagens de Raios – X.....	45
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.5	Resultados dos ensaios reológicos.....	47
4.5.1	Ensaio de espalhamento com o cone de Abrams.....	47

4.5.2	Ensaio de escoamento no funil	49
4.5.3	Resultados dos ensaios da caixa L	51
4.6	Ensaio mecânicos	52
4.6.1	Resistência à compressão axial nos cubos	52
4.6.2	Comportamento à tração na flexão em 4 pontos	61
4.7	Resultado obtido através de Imagens de Raios – X.....	69
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Conforme a população cresce e se desenvolve tecnologicamente, a mesma começa a ocupar uma parcela cada vez maior dos territórios. De acordo com os dados obtidos no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), as taxas de urbanização no Brasil estão crescendo de forma relevante, fato este que é responsável pelo crescimento do setor da construção civil.

Devido a crescente utilização do concreto, como consequência houve um alto consumo de recursos naturais, que aumentou exponencialmente, sendo um desses recursos a areia de rio, matéria-prima muito utilizada na produção de concretos e argamassas.

Esse fator causa um grande impacto ambiental por ser um recurso natural não renovável. Outro grande vilão do impacto ambiental causado pela construção civil é a geração de resíduos da construção e demolição (RCD). Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2023) 70% do entulho no Brasil é descartado de forma incorreta, sendo que a massa total dos resíduos da construção civil em 2022 foi de aproximadamente 120 milhões de toneladas, onde a maioria dessa massa foi descartada de forma irregular, em ruas, lagoas, terrenos baldios e até mesmo nos rios.

O início da reciclagem de resíduos da construção e demolição ocorreu na Europa, logo após o término da segunda guerra mundial, onde a fração de reciclagem já atinge 90%. No Brasil, este modelo de reciclagem encontrasse atrasado, comparado com a reciclagem de aço, embora já exista vários aterros de RCD, principalmente em grandes metrópoles. Este atraso envolve vários fatores, desde questões políticas até a questão comercial, pois os consumidores acham o produto de baixa qualidade. O principal uso do RCD se dá na área da pavimentação e também como agregados utilizados na produção de novas argamassas e concretos, normalmente de uso não estrutural (HENDRICKS, 1994; ZWAN, 1997; DORSTHORST & HENDRIKS, 2000).

Entre os diversos tipos de concretos utilizados, o concreto autoadensável (CAA) tem sido altamente introduzido na construção civil, por ser um material caracterizado com elevada fluidez no estado fresco. Esse compósito tem uma grande capacidade de escoamento pelas fôrmas somente devido ao seu peso, além

de ter uma vantajosa aplicação em locais de difícil acesso tais como, elementos estruturais com alta densidade de armadura, o que dispensa o processo de compactação e adensamento através de vibradores. Na sua dosagem é necessário a incorporação de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, bem como, agentes modificadores de viscosidade, para uma melhor trabalhabilidade e estabilidade do concreto no estado fresco. O teor de argamassa é superior ao concreto convencional, além de cuidados técnicos para conseguir uma boa capacidade de mistura para garantir sua estabilidade a exsudação e segregação no estado fresco (OKAMURA & OUCHI, 2003; GOMES & BARROS, 2009).

Dentre os tipos de concreto autoadensável, possui o microconcreto autoadensável e até autonivelante, com as mesmas características de trabalhabilidade, porém sem o uso de agregado graúdo. Os microconcretos normalmente são dosados de forma a obter elevadas resistências mecânicas, sendo usado em sua composição insumos naturais e virgens (BACARJI *et al.*, 2016).

Com a finalidade de criar um microconcreto autoadensável reciclado, um ciclo sustentável para o RCD além de minimizar o acúmulo do mesmo, causando um menor impacto ambiental gerado na construção, a substituição total da areia natural por areia reciclada se torna de enorme importância. Além de ampliar os estudos relacionados ao microconcreto com e sem o uso de RCD, visto que o mesmo carece de pesquisa (DORSTHORST & HENDRIKS, 2000).

De forma a garantir que o microconcreto autoadensável não perca as suas propriedades mecânicas, a incorporação das fibras metálicas se torna uma ótima alternativa. As fibras proporcionam aos compósitos pontes de distribuições de tensões, garantindo uma maior resistência mecânica e durabilidade (MARANGON, 2006).

Diante desse contexto, para a minimização de problemas ambientais, serão produzidos microconcretos autoadensáveis sustentáveis, com e sem fibras metálicas e avaliados em suas propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas no estado endurecido.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho reológico no estado fresco e mecânico no estado endurecido de um microconcreto autoadensável com substituição total do agregado natural por RCD, sem e com fibras metálicas em comparação com um concreto de referência com areia natural e sem fibras metálicas.

1.2 Objetivos específicos

- I. Caracterizar o comportamento do microconcreto autoadensável no estado fresco através dos ensaios de: espalhamento do tronco de cone de Abrams, fluidez em funil V e caixa L para as misturas de referência, com substituição total da areia natural por RCD, com e sem fibras;
- II. Avaliar o comportamento mecânico à compressão axial e à tração na flexão em quatro pontos para as misturas de referência, com substituição total da areia natural por RCD, além do com fibras;
- III. Avaliar o processo de fratura através da correlação de imagens digitais;
- IV. Analisar a distribuição das fibras metálicas em uma amostra cúbica e em uma placa através de imagens de raios – X.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto autoadensável (CAA)

O CAA foi desenvolvido pelo professor Hajime Okamura no Japão na década de 1980. Seu surgimento ocorreu pela necessidade de estruturas mais duráveis, econômicas e de menor tempo de execução, pois nessa época havia escassez da mão de obra qualificada, o que conseqüentemente influenciava de forma direta na durabilidade à longo prazo do concreto. Avaliado no estado fresco, sua maior característica é a fluidez, capaz de preencher e passar por obstáculos densos de armaduras garantindo uma resistência a segregação. Além de usar uma proporção otimizada dos componentes e não ter necessidade de adensamento mecânico (GOMES & BARROS, 2009).

Os constituintes do CAA são os mesmos do concreto convencional, porém sua diferença está associada há um maior teor de finos, e conseqüentemente um consumo maior de cimento. Possui uma menor taxa de agregado graúdo, e a incorporação de superplastificante (SP), para a redução do fator água/cimento (RAJHANS *et al.*, 2018).

Outros benefícios do CAA é a eliminação de ruídos na execução da obra, recorrente do uso dos vibradores, melhorando o ambiente de trabalho e reduzindo problemas de saúde dos colaboradores, além de um acabamento com melhor qualidade em peças superficiais (GOMES & BARROS, 2009).

No Brasil, a norma que regulamenta o CAA é a NBR 15823 – Parte 1 a 6 (ABNT, 2017) determinando seu controle no estado fresco, parâmetros para a verificação de autoadensabilidade, assim como suas classes e as diretrizes para classificação do CAA.

2.1.1 Microconcreto autoadensável

Segundo Bacarji *et al.*, (2016) o microconcreto pode ser classificado como um tipo de concreto com capacidade de obter elevados valores de resistência à compressão. Sua mistura é composta por cimento Portland, aditivos que controlam o seu desempenho no estado fresco e agregados miúdos (de no máximo 4,8 mm de diâmetro) devidamente caracterizados. Comparado com os outros concretos, sua

porosidade é reduzida, por haver somente materiais finos, o que o torna mais durável.

De acordo com Mehta & Monteiro (2008), a incorporação de aditivos superplastificantes ocorre pela necessidade de trabalhar com a redução na quantidade de água acrescentada, o que gera uma diminuição na relação água/cimento.

2.2 Resíduos da Construção e Demolição (RCD)

Segundo o Art. 2º da Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) caracterizam-se como RCD os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Também os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: solos, rochas, metais, resinas, tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros.

Os RCDs variam conforme a sua composição, ou seja, dos materiais empregados e da natureza dos processos construtivos. No Brasil, são constituídos principalmente de: concreto, argamassa, cerâmicas e rochas (CARNEIRO *et al.*, 2000; FERRAZ *et al.*, 2001).

Os meios mais utilizados para a classificação dos RCDs são basicamente determinar a composição do resíduo visivelmente, em termos de proporção de concretos, argamassas e materiais cerâmicos. Entretanto, essa avaliação não permite separar de forma conveniente o concreto, a argamassa e o material cerâmico, pois é de difícil avaliação o teor da pasta de cimento, assim como, a porosidade da mesma (ANGULO, 2005).

A composição química dos RCDs é de grande importância quando se trata da reutilização dos mesmos. Esta avaliação permite, de forma mais criteriosa, identificar os componentes presentes no resíduo, de modo a informar se é possível ou não a sua reutilização para determinado destino. Este tipo de análise permite obter um maior controle de qualidade dos materiais reciclados, aumentando a credibilidade de novas aplicações ou até mesmo explicações para qual o uso não é recomendado.

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os RCDs continuam sendo gerados em grande escala. De acordo com John (2000), os

mesmos representam mais de 50% de resíduos sólidos urbanos, responsáveis pelo esgotamento de aterros em cidades de médio e grande porte.

Apesar do RCD ser considerado e visto como um grande problema ambiental, o mesmo possui várias aplicações economicamente viáveis. São os casos de inúmeros estudos realizados para a substituição dos agregados miúdos e graúdos naturais por agregados reciclados. Neste caso, destacam-se os estudos realizados por Branco (2012), que aplicou RCD na composição do concreto como agregado miúdo; Klein (2008), que utilizou areia de britagem e Silva (2012) com agregado de telha cerâmica.

De acordo com Pinto (1999) os resíduos de construção de algumas cidades no Brasil variam de 41 e 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos. A reciclagem deste material se apresenta com grandes vantagens, como uma solução sustentável de forma a reduzir impactos ambientais, econômicos e sociais, causados pela má gestão desses resíduos.

2.3 Material compósito

De maneira simplificada, pode-se interpretar que os materiais compósitos são constituídos pela combinação de pelo menos dois materiais, que após a mistura ainda podem ser claramente identificados em sua massa, sendo as propriedades do compósito superiores à de seus constituintes separados (SANTIAGO, 2002).

O material compósito pode ser classificado em duas fases: um material base, denominado matriz (fase contínua), sendo a matriz que oferece estrutura ao compósito, ocupando os espaços vazios que se encontram entre os reforços e o elemento de reforço (fase descontínua), possibilitando melhorar a resistência mecânica ou rigidez ao material compósito como um todo (CALLISTER JR, 2002; LAMEIRAS, 2007).

O concreto é caracterizado como um material compósito, formado pela união de materiais com o objetivo de obter um novo material de maior qualidade. A sinopse de materiais compósitos envolve a mistura de compostos de diferentes naturezas para obter novas propriedades aos materiais.

Segundo Mehta & Monteiro (2008), o motivo pela alta utilização do concreto está relacionado com a facilidade de que os elementos estruturais de concreto

podem ser executados, com uma variedade de formas e tamanhos, além de ser economicamente viável e de fácil acesso no canteiro de obras.

2.4 Utilização de RCDs e fibras metálicas em concreto

Um dos maiores problemas dos RCDs quando há substituições de agregados, segundo Silva *et al.*, (2014) é a sua heterogeneidade, pois os mesmos são compostos de diferentes materiais, como cerâmica, argamassa, concreto, vidro, entre outros, o que dificulta a separação eficiente dos devidos componentes. Os variados tipos de construção fazem com que os agregados provenientes dos RCDs variem de qualidade devido a sua composição, o que de certa forma, produz materiais de construção de grande variabilidade.

Com o intuito de obter mais dados para a minimização deste problema, Kaza *et al.*, (2018) apontaram em seus estudos uma geração de resíduos global, diferenciando por região. Entanto é possível observar uma grande variabilidade de não somente nas propriedades dos resíduos, mas também na quantidade de produção em cada região do mundo.

Em contrapartida, a ideia de utilizar materiais fibrosos para reforçar os materiais frágeis é um exemplo que vem da própria natureza. O João de Barro, por exemplo, usa, de forma bastante eficiente, galhos e folhas de árvores para reforçar a estrutura do seu ninho composto basicamente de barro. De acordo com Martineau *et al.*, (2002) e Santiago (2002) as fibras utilizadas podem ser de grande variedade, como: fibras de vidro, carbono, aramida, polipropileno, aço, crina de cavalo, celulose, entre outras.

As adições de fibras metálicas em materiais compósitos servem como um elemento de reforço, sua principal função é de reforçar mecanicamente as matrizes de cimento, cal ou gesso, por exemplo. Segundo Martineau *et al.*, (2002) a ação das fibras nos materiais compósitos é impor obstáculos à propagação de fissuras.

As fibras atuam como pontes de transferências dos esforços através da fissura, o que garante uma capacidade de resistência após a abertura da mesma. Quando ocorre a primeira fissura em um concreto sem a adição de fibras, a abertura progressiva dessa fissura ocasiona o colapso da peça. Entretanto, nos concretos com a incorporação de fibras em sua mistura, a fratura é postergada. A ruptura, neste caso, transforma-se em um processo progressivo, onde as pontes de

transferências formadas pelas fibras absorvem parte das solicitações, originando fissuras mais distribuídas (TENESI & AGOPYAN, 1997; MATSUMOTO & LI, 1999).

Outro ponto analisado em materiais cimentícios reforçados com fibras é que o número de fissuras aumenta, porém, a abertura dessas fissuras torna-se menor, reduzindo a área total de fissuração (SWAMY & STRAVIRDES, 1979; KOVLER *et al.*, 1992 apud TANESI, 1997).

2.5 Resistência à compressão axial do concreto autoadensável

Segundo estudos realizados por alguns autores, a resistência à compressão do concreto autoadensável com utilização de RCD é menor do que quando utilizado o agregado natural. Essa redução pode atingir cerca de 45% da resistência em relação aos concretos de referência (HANSEN, 1992; GÓMEZ-SEBERÓN, 2002, 2003; XIAO & FALKNER, 2007).

Todavia, há autores que mostram resultados opostos, obtendo um aumento da resistência à compressão no concreto de até 33% do que quando utilizado o agregado natural (LEITE, 2001; KHATIB, 2005).

As causas para identificar essa discrepância são dadas por vários fatores, desde a britagem do RCD, pelo tipo de britadores que foi utilizado na fabricação dos agregados reciclados, o que influencia diretamente no formato dos mesmos e, com isso, nas propriedades dos concretos produzidos. A composição do resíduo é outro fator de grande influência para essa discordância, além do cimento utilizado e da metodologia empregada.

Na maior parte dos casos, o agregado reciclado tem menor resistência que o agregado natural, devido ao seu aspecto físico, com elevada porosidade, alta absorção de água e uma baixa massa específica. Uma vez que a matriz cimentícia com RCD for menos resistente que o próprio agregado, o mesmo romperá na matriz. Entretanto, se a matriz produzida tiver um maior fator de resistência, o agregado utilizado se torna de grande importância, rompendo, deste modo, no agregado.

Conforme Ravindrarajah *et al.*, (2000) os resultados alcançados foram de 68% de resistência mecânica inferior com agregado reciclado do que com agregados naturais. Logo, para as matrizes cimentícias com baixa relação água/cimento (mais resistentes) a tendência é de que tenha uma menor resistência à compressão do que quando utilizados agregados naturais.

A utilização dos agregados reciclados em concreto de alta resistência impacta mais que comparado com o concreto com baixa resistência, porém há técnicas para elevar a resistência à compressão do concreto com a utilização de RCD para igual ou superior que o concreto convencional. Segundo Tutikian & Dal Molin (2008) o uso de adições minerais como: sílica ativa, metacaulim, escórias de aciaria, de alto forno ou de cobre, além de aditivos superplastificantes e de fibras como: metálicas, poliméricas e cerâmicas são algumas das soluções (MARANGON, 2006).

Outra forma é reduzir a relação a/c na produção do concreto com uso de RCD, o que implica em um maior consumo de cimento, que segundo Hansen (1992) para manter a mesma resistência que o concreto convencional é necessário pelo menos 5% a mais de cimento na substituição do agregado graúdo e em torno de 15% quando os dois agregados são substituídos.

2.6 Resistência à tração do concreto autoadensável

A resistência à tração do concreto autoadensável com agregado reciclado também apresentou um decréscimo quando comparado com o concreto convencional, embora com menor intensidade que a resistência à compressão axial. Essa redução apresentou uma variação de 6 a 15% para concretos fabricados com RCD (RAVINDRARAJAH *et al.*, 2000; DHIR *et al.*, 2004b; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, 2003).

Todavia, como relatado por Ravidrarajah & Tam (1995) há um acréscimo na resistência para agregados reciclados de concreto. Explicado por um aumento do teor de pasta de cimento a uma constante relação água/cimento. A resistência da ligação pasta/agregado tem maior influência a resistência à tração que na resistência à compressão. Logo, concretos fabricados com agregado reciclado de concreto, possuem uma maior chance de aumentar a resistência à tração.

A redução da resistência à tração com relação a resistência à compressão é de menor impacto, pois a resistência à tração leva em consideração os mecanismos de aderência física entre as partículas. O uso de agregados reciclados promove uma boa aderência entre a pasta e agregado, por ter sua forma mais irregular e rugosa, logo a transferência do concreto com o agregado reciclado é relativamente boa (LEITE, 2001). Por haver essa boa transição entre concreto e agregado reciclado a resistência à tração não é tão afetada.

3 METODOLOGIA

3.1 Local de execução

O trabalho foi realizado na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) campus Alegrete-RS no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção – LEMAC do curso de Engenharia Civil.

3.2 Materiais

Para as produções dos microconcretos autoadensáveis foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP V-ARI, sílica da casca de arroz (SCA), areia natural (AN), cinza volante (CV), fibra de aço (FA), superplastificante, água potável e areia de resíduos da construção e demolição (RCD).

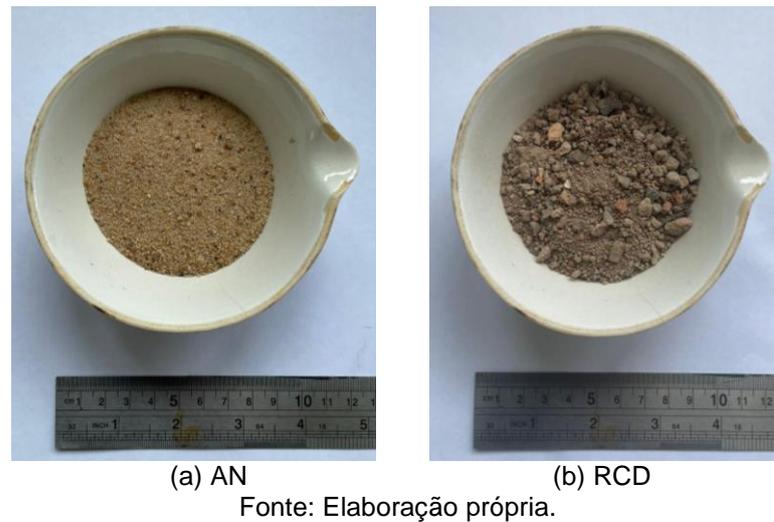
3.3 Caracterização dos materiais

O presente capítulo apresenta as características dos materiais que compõem os microconcretos.

3.3.1 Caracterização dos agregados miúdos

Para a realização do trabalho foi utilizado dois tipos de agregados miúdos, areia natural proveniente de rio e comercializada na cidade de Alegrete-RS e areia de resíduos da construção e demolição, fornecida pela empresa Soluções em Beneficiamento de Resíduos e Comercio Ltda. (SBR), unidade de Canoas-RS. A mesma tem origem do processamento de resíduos de obras e de demolições da cidade de Canoas-RS conforme apresentados na Figura 1 (a e b).

Figura 1 – Agregados miúdos



O agregado miúdo composto por RCD será o mesmo utilizado por Grenzel (2023). Sua caracterização foi através da norma ABNT NBR 15116 (2021a) que especifica os requisitos para a produção e recepção dos agregados reciclados, obtidos através dos resíduos da construção civil (RCC), classe A. Conforme Grenzel (2023) para determinação da composição do RCD, realizou-se o processo especificado em norma, o qual é dado pela classificação dos grupos de fragmentos do RCD. Foi utilizado uma amostra representativa, que foi peneirada, e utilizada a fração passante na peneira nº 4 e retida na peneira nº 8. A mesma foi lavada, seca em estufa e resfriada em temperatura ambiente. Após esse processo foi contado e identificado uma amostra de no mínimo 300 grãos (Figura 2). Com o propósito de detalhar a composição em percentual de cada material, foi realizada a classificação dos grupos, identificando: pasta cimento (G1), rocha (G2), cerâmica vermelha (G3), e materiais sem identificação e indesejáveis (G4), conforme apresentado na Tabela 1.

Figura 2 – Separação de RCD para contagem de grãos



Fonte: Grenzel (2023).

Tabela 1 – Composição dos agregados reciclados

	Classificação	Percentual (%)
G1	Pasta Cimento	54,83
G2	Rocha	16,36
G3	Cerâmica Vermelha	22,86
G4	Materiais indesejáveis	5,95

Fonte: Grenzel (2023).

De acordo com as porcentagens obtidas e com a classificação de subclasses da norma ABNT NBR 15116 (2021a), o RCD avaliado acima compõem-se de uma parcela G3 de 22,86% o que caracteriza como um resíduo ARM – Agregado Reciclado Misto.

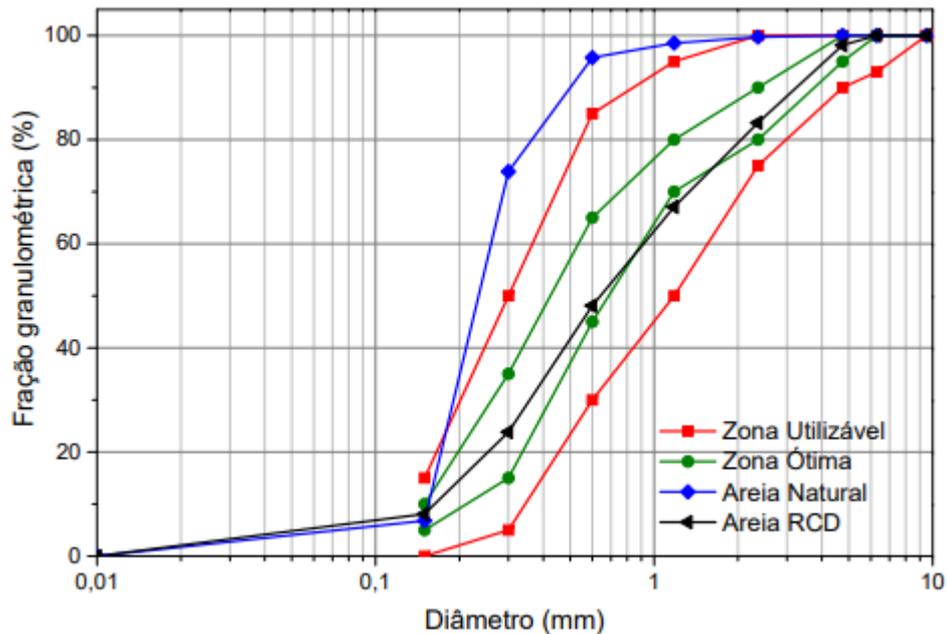
Os demais ensaios de caracterização foram realizados de maneira igual para os dois agregados. Sendo executadas: ABNT NBR 17054 (2022a), que determina a composição granulométrica, ABNT NBR 16916 (2021c) determinando a densidade e absorção de água, e ABNT NBR 16972 (2021e) que identifica a massa unitária e o índice de vazios.

Para a realização dos ensaios, foi separado 40 kg de cada agregado, que foram colocados em bandejas e levados à estufa por 24 h em temperatura de 105 (± 5) °C, com a intenção de retirar a umidade dos mesmos. O resfriamento ocorreu em temperatura ambiente.

Para reduzir a amostra e garantir a homogeneidade foi utilizado um quarteador. Com a realização do peneiramento do material, foi coletado as frações do tamanho dos grãos, utilizados para obter as suas respectivas curvas

granulométricas, conforme a Figura 3. Na mesma imagem foram colocados os limites aceitáveis e ótimos previstos pela norma ABNT NBR 7211 (2022c).

Figura 3 – Granulometria dos agregados miúdos



Fonte: Grenzel (2023).

Como é possível visualizar na Figura 3, a areia natural ficou com sua granulometria totalmente fora da zona aceitável, por ser muito fina. O agregado de RCD permanece com praticamente todas as suas frações granulométricas dentro da zona ótima estabelecida pela norma, por se tratar de um material industrializado. A partir dos ensaios de caracterização física, foi elaborada a Tabela 2, com as características da areia natural e da reciclada.

Tabela 2 – Caracterização da areia natural e do RCD

Norma	Caracterização	Areia	RCD
NBR 16.972	Massa unitária solta (g/cm ³)	1,55	1,19
	Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,69	1,35
	Densidade seca (g/cm ³)	2,50	2,19
NBR 16.916	Densidade Sat. Sup. Seca (g/cm ³)	2,51	2,30
	Absorção de água (%)	0,18	4,73
NBR 17.054	Diâmetro máximo (mm)	0,60	4,75
	Módulo de finura	1,25	2,71

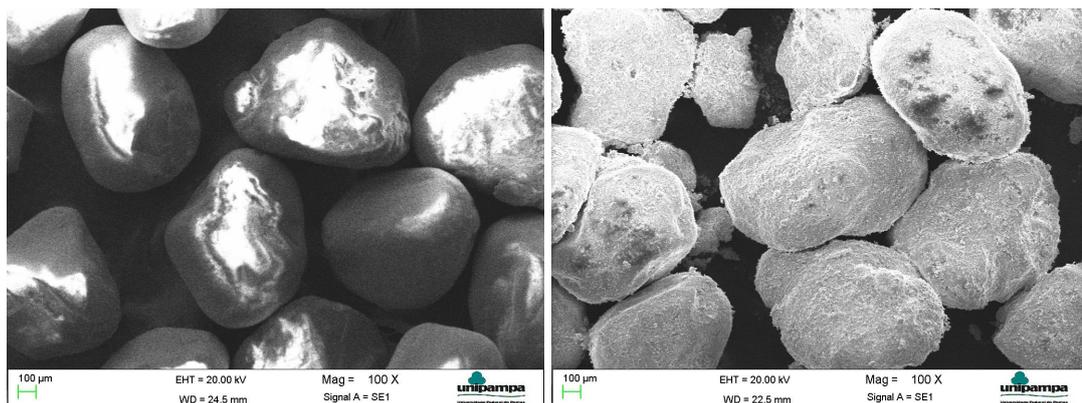
Fonte: Grenzel (2023).

Como mostra a Tabela 2 acima, a massa unitária solta, juntamente com a massa unitária compactada da areia de RCD, foi inferior comparada com o da areia natural, cerca de 23 e 20% menores, respectivamente. A densidade seca e a densidade saturada com superfície seca, também apresentaram valores inferiores para o agregado de RCD, com 12 e 8% menores que a areia natural. Por outro lado, a absorção de água da areia de RCD foi 26 vezes maior comparado com a areia natural. O mesmo aconteceu para o diâmetro máximo, onde o agregado de RCD foi obtido o valor de 4,75 mm enquanto a areia natural foi de 0,6 mm. O módulo de finura foi de 1,25 para a areia natural, classificando assim como um material muito fino, e em contrapartida foi obtido o valor de 2,71 para o agregado reciclado (RCD), que o torna uma areia média.

Com a intenção de avaliar a estrutura morfológica da areia natural e a areia de RCD, ambos os agregados miúdos retidos na peneira 450 μm , foram submetidos ao ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Como pode ser observado na Figura 4 (a e b), com a ampliação de 100X dos agregados miúdos é possível analisar na areia natural que seu formato é mais uniforme, circular e menos poroso, diferentemente na areia de RCD que tem uma superfície mais lamelar, irregular e porosa.

Figura 4 – Imagens de MEV



(a) AN

(b) RCD

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Cimento Portland e materiais pozolânicos

O cimento Portland escolhido para a fabricação dos microconcretos foi o CP V-ARI (Figura 5) devido a sua característica de maior cinética de hidratação e sua alta resistência nas idades iniciais, fornecido pela empresa Itambé Cimentos. A norma brasileira que trata desse tipo de cimento é a ABNT NBR 16697 (2018), e sua massa específica foi determinada de acordo com a ABNT NBR 16605 (2017), conforme ilustrado na Figura 6, o qual teve seus resultados obtidos através da Equação 1.

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Onde:

ρ é a massa específica do material ensaiado, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

m é a massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);

V é o volume descolado pela massa do material ensaiado ($V2' - V1'$), expresso em centímetros cúbicos (cm^3);

$V2' - V1'$ são os valores de $V1$ e $V2$, respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos (cm^3).

Figura 5 – Cimento Portland CP V-ARI



Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 – Ensaio para determinação da massa específica



Fonte: Elaboração própria.

A massa específica obtida do cimento foi de $3,01\text{g/cm}^3$, a mesma encontra-se nos parâmetros aceitáveis pela norma e a indústria de fabricação Itambé Cimentos.

A cinza volante (Figura 7) fornecida pela empresa Pozo Fly, apresenta massa específica de $1,98\text{ g/cm}^3$, determinado pelo frasco de Le Chatelier (ABNT NM 23 (2001)). Tem a função de hidratação lenta com baixa liberação de calor e aumento da resistência ao ataque de sulfatos e outros agentes agressivos ácidos, evitando o sobreaquecimento da massa e a fissuração.

Figura 7 – Cinza Volante



Fonte: Elaboração própria.

A sílica da casca de arroz (Figura 8), da empresa Sílica Verde do Arroz (SVA) de Alegrete-RS, foi obtida a partir da queima da casca do arroz de forma controlada em leito fluidizado, transformando-se em um material pozolânico predominantemente amorfo. Sua forma geométrica contribui para uma melhora na trabalhabilidade da mistura, pois sua granulometria auxilia a preencher os espaços vazios existentes no microconcreto, além de reagir com o hidróxido de cálcio produzido pela reação química do cimento Portland.

Figura 8 – Sílica da casca de arroz



Fonte: Elaboração própria.

A composição química da sílica da casca de arroz, foi obtida através da Fluorescência de Raios - X desenvolvida por Jucá (2020), como mostrado na Tabela 3 (a SCA que será utilizada é do mesmo lote usado por Jucá (2020)). Sua denominação SCA, deu-se pelo elevado teor de sílica (91,48%).

Tabela 3 – Composição e teores da SCA

Componente	Teor (%)
Perda ao Fogo	3,50
Dioxido de Silício - SiO ₂	91,48
Óxido de Cálcio - CaO	0,36
Óxido de Magnésio - MgO	0,32
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,05
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,00
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,40
Óxido de Manganês - MnO	0,32
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	0,15
Pentóxido de Difósforo - P ₂ O ₅	0,45
Area Específica	21142 m ² /kg

Fonte: Jucá (2020).

3.3.3 Fibras metálicas

Para a produção do microconcreto autoadensável, foram utilizadas fibras metálicas (aço), adquiridas na empresa Astra Fibras Metálicas (Figura 9), do estado de São Paulo, na cidade de Itatiba. Produzidas pelo processo de trefilação a fio com aço inox AISI 310.

Figura 9 – Fibras metálicas



Fonte: Elaboração própria.

A composição química das fibras de aço, foi fornecida pela empresa Astra Fibras Metálicas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química das fibras de aço

Elemento	Teor (%)
Carbono - C	0,04
Ferro - Fe	61,97
Silício - Si	0,36
Manganês - Mn	1,49
Fósforo - P	0,03
Enxofre - S	0,04
Cromo - Cr	17,00
Níquel - Ni	19,08

Fonte: Astra Fibras Metálicas.

A forma escolhida das fibras foi a ondulada, pois fornece uma melhor aderência com a matriz cimentícia. Suas características geométricas, assim como a resistência à tração, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características das fibras de aço

Características	Fibras de Aço
Comprimento (mm)	12,00
Diâmetro (mm)	0,50
Fator de forma (l/d)	24,00
Resistência à tração a 870° C (MPa)	152,00

Fonte: Astra Fibras Metálicas.

3.3.3 Aditivo químico

O superplastificante utilizado foi da linha MC-PowerFlow 4001, sendo um aditivo redutor de água tipo 2 (superplastificante PCE de pega normal) à base de polímeros policarboxilatos (Figura 10). Seu mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com teores de água extremamente baixo e excelente trabalhabilidade. Compatível com todas as classes de cimento Portland, suas aplicações principais são em concreto de ultra resistência, concreto autoadensável, de alto desempenho e de alta fluidez.

Figura 10 – Aditivo químico



(a) Superplastificante MC-PowerFlow

Fonte: Elaboração própria.

3.4 Composição dos microconcretos

O traço de referência para a realização do presente trabalho baseou-se na composição de Formagini (2005). O mesmo foi adaptado para desenvolver um microconcreto sustentável, utilizando os materiais disponibilizados pelo Grupo MAEC. Com isso foram realizadas algumas modificações, como: substituição do CP III 40 pelo CP V – ARI, sílica ativa e sílica 325 pela sílica da casca de arroz, devido a esses materiais apresentarem características de suas composições granulométricas muito semelhantes. Uso de cinza volante ao invés da fibra de wollastonita, além de remover a inserção das fibras de aço. A mistura de Formagini, apresentada na Tabela 6 tem valores de resistência à compressão de 154,90 MPa em 28 dias e 185,17 MPa em 180 dias.

Tabela 6 – Traço otimizado de Formagini

Materiais	Traço Otimizado		Traço Utilizado
	Fração Volumétrica	Peso (kg/m ³)	Peso(kg/m ³)
Cimento CP III 40	0,3381	1016,60	1011
Silica Ativa	0,0261	58,40	58
Silica flour 325#	0,0301	80,10	79
Areia 150-300µm	0,0225	60,50	60
Areia 425-600µm	0,3082	827,50	823
Microfibra de wollastonita	0,0263	76,70	76
Fibra de aço	0,02	158	158
Dispersante PA	0,045	50	50
Água	0,1626	162,6	162
Ar aprisionado	0,0368	3,68%	3,75

Fonte: Formagini (2005).

Com o intuito de criar um microconcreto autoadensável sustentável, toda a porção do agregado miúdo composto por areia natural, foram substituídos por resíduos da construção e demolição, com utilização de somente duas faixas granulométricas. Sendo esta mistura composto por: cimento Portland CP V-ARI, sílica da casca de arroz, RCD, cinza volante, superplastificante e água.

Primeiramente, as areias foram submetidas a secagem em estufa à 105 (±5) °C por 24 h, conforme ilustra a Figura 11 (a e b), respectivamente. Após a secagem as faixas granulométricas das areias foram obtidas através do peneirador mecânico (Figura 12).

Figura 11 – Areias de RCD na estufa para secagem



(a) Areia de RCD úmida

(b) Areia de RCD após 24 h

Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 – Peneirador mecânico utilizado para obter as frações de AN e RCD utilizadas



Fonte: Elaboração própria.

A mistura com adições de fibras de aço, permaneceu com os componentes semelhantes a anterior, porém com a inserção de fibras metálicas. As porcentagens de material inerte foram modificadas, ou seja, a areia de RCD. Todas as misturas produzidas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição das misturas de microconcreto que foram produzidas: Mistura de Referência (AN); Mistura com substituição de areia natural por areia de RCD (ARCD) e Mistura com substituição de areia natural por areia de RCD e fibras metálicas (ARCDF)

Materiais	AN	ARCD	ARCDF
	Peso(kg/m ³)	Peso(kg/m ³)	Peso(kg/m ³)
Cimento CP V ARI	1011	1011	1011
Silica da casca do arroz	110	110	110
Areia natural 150 - 300µm	87	-	-
Areia natural 425 - 600µm	850	-	-
Areia de RCD 150 - 300µm	-	74	52
Areia de RCD 425 - 600µm	-	694	672
Cinza Volante	52	52	52
Superplastificante	25	81	81
Água*	162	162	162
Fibra metálica	-	-	158
Relação a/c	0,16	0,16	0,16

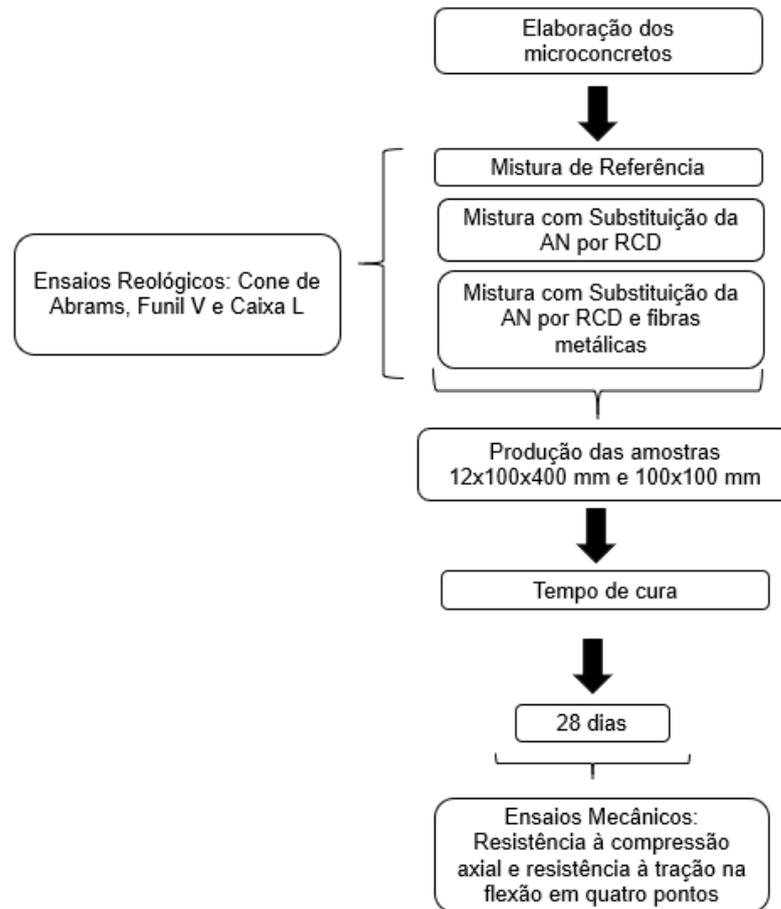
Fonte: Elaboração própria.

Nota: *Cabe salientar que para a traço com areia de RCD e o traço com adição de fibras metálicas, houve a correção da absorção da água, visto que o agregado de RCD consome 26 vezes mais de H₂O, comparado com a areia natural.

3.5 Procedimento experimental

Na Figura 13 está esquematizado o procedimento experimental realizado no trabalho. Os três microconcretos produzidos foram submetidos à ensaios reológicos no estado fresco. Após, ocorreu a moldagem das placas com dimensões de 12x100x400 mm para o ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos e cubos com dimensões de 100x100x100 mm para o ensaio de resistência à compressão axial, posteriormente foram acondicionados em câmara úmida durante 28 dias de idade. O quantitativo dos mesmos é apresentado na Tabela 8.

Figura 13 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8 – Quantitativo das amostras para os ensaios mecânicos

Ensaio de resistência	AN	ARCD	ARCDF	Total de amostras
À compressão axial	3	3	3	21
À tração na flexão em 4 pontos	4	4	4	

Fonte: Elaboração própria.

3.5.1 Processo de execução das misturas

Inicialmente, foram separados todos os materiais de cada mistura, de acordo com a Tabela 7. A pesagem dos mesmos ocorreu com o auxílio de duas balanças, de plataforma digital Amira® com capacidade de 100 kg e de precisão WLC 10/A2 RADWAG® com capacidade máxima de 10 kg.

Com o auxílio do misturador turbilhonador MT120 do tipo planetário e capacidade 120 litros, a mistura iniciou com a colocação de todos os materiais cimentícios, pozolânicos e agregados. Imediatamente, após a colocação dos

materiais o misturador e o cronômetro foram acionados, fazendo com que a mistura perdurasse por 1 min. Passado esse tempo, foi adicionado 80% da água prevista para a mistura. Na sequência foi adicionado, ainda com o misturador ligado, o superplastificante de forma lenta, com o intuito de não haver concentração do mesmo somente em uma parte da mistura. O recipiente do superplastificante foi lavado por 3 vezes com o restante da água. Aproximadamente em 10 min de mistura, o misturador foi desligado por 30 s e realizada a raspagem das paredes internas e do fundo. Transcorrido este tempo, o misturador foi ligado até completar 25 min.

Na execução da segunda mistura, a sequência da inserção dos materiais ocorreu de acordo com a primeira. No entanto, esta segunda mistura, foi também a mistura para ajustar a quantidade de superplastificante necessária para o espalhamento requerido de no mínimo 550 mm. Transcorrido 10 min, foi possível observar visivelmente que a mistura se encontrava seca, sendo adicionado aproximadamente 2,24 vezes a quantidade de superplastificante. Também foi adicionado mais água, a fim de corrigir o teor de absorção do agregado de RCD, que foi de 4,73%. O aumento do teor de superplastificante e a correção da água absorvida pelo agregado de RCD, foi necessária uma vez que o agregado de RCD possui uma forma irregular e alta área superficial, conforme mostrado na Figura 4 do item 3.3.1. Cabe salientar, que a segunda composição teve um tempo de mistura de aproximadamente 1 h. Esse tempo foi necessário devido aos ajustes citados anteriormente e, é sabido que quando adicionado todos os materiais no início da mistura (principalmente o superplastificante e água absorvida pelo agregado de RCD), o procedimento realizado na primeira mistura é suficiente para obter as propriedades requeridas. Isso foi comprovado com a realização da mistura do terceiro traço.

Ao realizar o terceiro traço, seguiu os mesmos procedimentos do primeiro traço, com exceção que as fibras foram adicionadas após os 25 min de mistura, totalizando o processo em 27 min.

3.6 Ensaios reológicos e mecânicos nos microconcretos autoadensáveis

Neste capítulo são abordados os procedimentos de ensaios reológicos: cone de Abrams, funil V e caixa L, além dos ensaios mecânicos: resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão em quatro pontos.

3.6.1 Ensaio de espalhamento cone de Abrams

O ensaio cone de Abrams (Figura 14) determina a fluidez, em fluxo livre, sob a ação do próprio peso do CAA e o tempo de escoamento em que a mistura leva para alcançar o espalhamento de 500 mm. Normatizado pela ABNT NBR 15823-2 (2017), o valor do espalhamento é obtido pela média de duas medições perpendiculares do diâmetro do espalhamento, após a retirada vertical do cone totalmente preenchido, sem nenhum adensamento. Os resultados do ensaio permitem identificar a classe de espalhamento, a viscosidade plástica aparente e o índice de estabilidade visual.

Figura 14 – Cone de Abrams

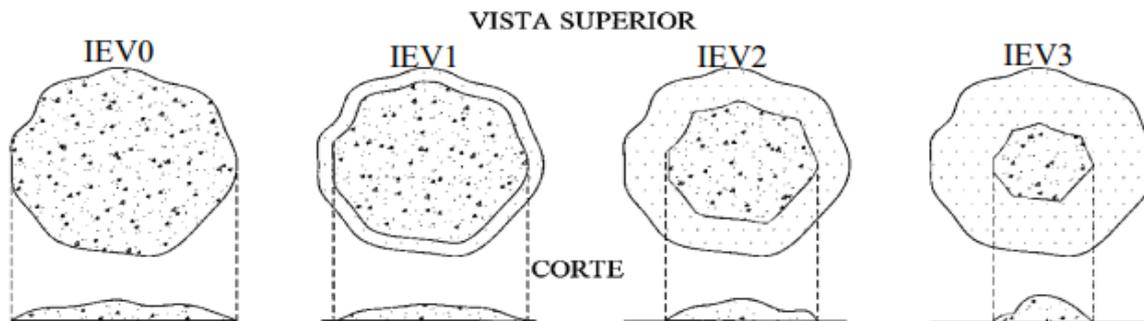


Fonte: Jucá (2020).

O índice de estabilidade, classificado de forma visual, evidencia possíveis segregações e exsudação da mistura, sendo possível identificar a classe de homogeneidade pela distribuição aparente dos agregados, como mostra a Figura 15, elaborada por (Jucá, 2020) com classificação inicial em IEV0 para o concreto que apresenta homogeneidade e sem segregação, até IEV3 para misturas com

concentração de agregados no centro do espalhamento, e argamassa nas extremidades.

Figura 15 – Índice de estabilidade visual



Fonte: Jucá (2020).

3.6.2 Ensaio de tempo de escoamento no funil V

Este ensaio tem por finalidade analisar a viscosidade da mistura, regulamentado pela norma ABNT NBR 15823-5 (2010). Para sua realização foi preenchido todo o funil (Figura 16) e logo após aberta a comporta inferior do mesmo, onde o concreto é escoado pela ação da gravidade. Foi iniciado a contagem do tempo no momento em que a comporta foi aberta até o final do escoamento de todo o concreto.

Figura 16 – Funil V



Fonte: Jucá (2020).

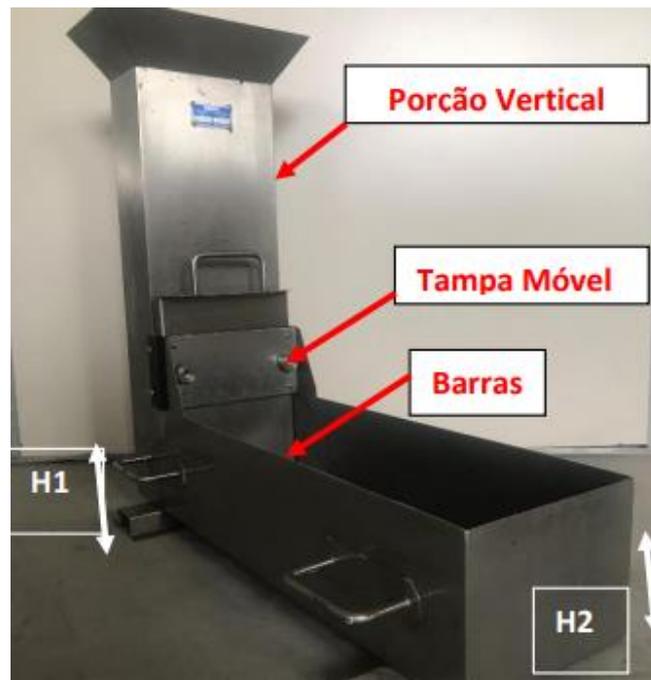
O tempo em que a mistura leva para escoar totalmente determina a sua viscosidade, sendo, neste caso, em um tempo de longa duração uma maior

viscosidade, ou em um curto período de tempo, baixa viscosidade. Caso venha a entupir a saída pela mistura, caracteriza-se dificuldade no lançamento e no adensamento do CAA.

3.6.3 Ensaio da caixa L

O Ensaio da caixa L mostrado na Figura 17, visa estimar a capacidade que a mistura possui no estado fresco de fluir através das armaduras. Regulamentado pela norma ABNT NBR 15823-4 (2017), o procedimento do ensaio foi adicionar o CAA na parte vertical da fôrma, e depois abrir a tampa móvel, possibilitando o escoamento do concreto entre as barras.

Figura 17 – Caixa L



Fonte: Jucá (2020).

Após o procedimento foi realizado a razão entre a altura (H2) da fôrma e a altura (H1), juntamente com o tempo de escoamento. A razão é proporcional a facilidade de escoamento, ou seja, quanto maior a razão $H2/H1$, maior a capacidade de fluxo. O ensaio foi realizado com uma grade de 3 barras de aço, como se fossem obstáculos.

3.6.4 Comportamento à compressão axial

O ensaio para avaliar este tipo de comportamento foi baseado na norma ABNT NBR 5739 (2007) com adaptações e realizado na máquina universal de ensaios Instron, como mostra a Figura 18, com capacidade de 1500 kN. O ensaio ocorreu com velocidade de deslocamento do travessão do equipamento em 0,20 mm/min. A correlação de imagens digitais foi feita através da pintura de uma das faces dos cubos, na cor branca, as quais também foram submetidas a pintura na cor preta de modo a formar um padrão estocástico de pontos para avaliar tanto a deformação quanto o processo de fissuração do material. O ensaio foi monitorado por gravação de vídeo com câmera traseira de aparelho celular e posteriormente analisado no Software GOM Correlate.

Os ensaios nos corpos de prova ocorreram na idade de 28 dias, sendo que até a data de ensaio os mesmos ficaram em câmara úmida.

Figura 18 – Máquina universal de ensaios Instron



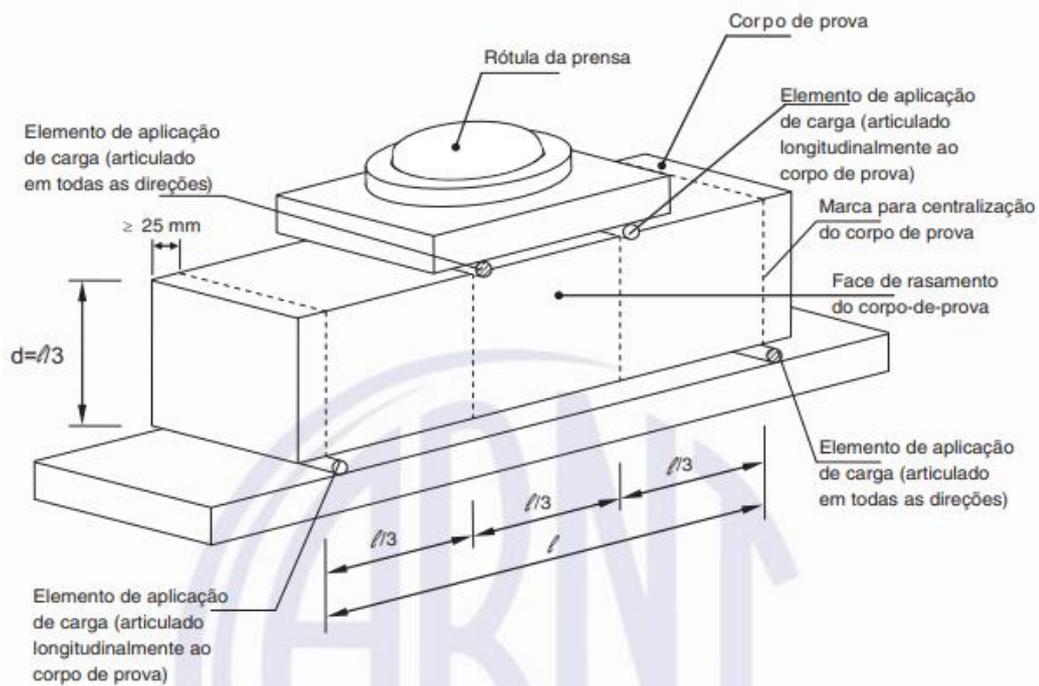
Fonte: Elaboração própria.

3.6.5 Comportamento à tração na flexão em quatro pontos

A determinação da resistência à tração na flexão em quatro pontos foi realizada em quatro placas de cada mistura de microconcreto autoadensável, totalizando 12 placas. O procedimento para a realização da correlação de imagens digitais foi o mesmo que no ensaio à compressão axial, também realizados na idade de 28 dias. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, a placa foi posicionada no equipamento, como estabelece a norma ABNT NBR 12142 (2010) através da Figura 19 esquematizada abaixo. Emprega-se a carga até a ruptura do microconcreto. A resistência à tração na flexão é calculada conforme a Equação 2.

$$F_{ctf,f} = F \cdot \ell / b \cdot d^2 \quad (2)$$

Figura 19 – Esquematização do ensaio à tração na flexão em quatro pontos



Fonte: NBR 12142:2010.

Caso em que ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% de ℓ , foi utilizada a Equação 3 para calcular a resistência a tração na flexão:

$$F_{ctf,f} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d^2 \quad (3)$$

Onde:

$F_{ctf,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em MPa;

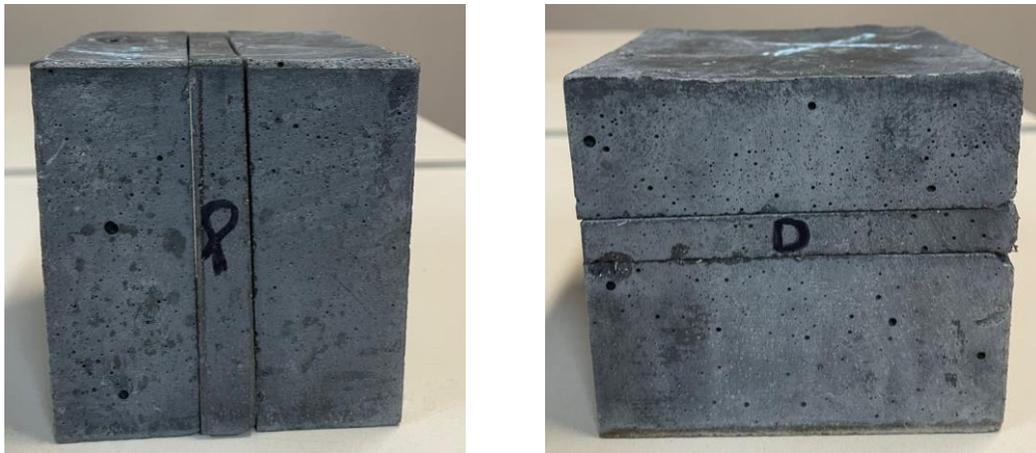
F é a força máxima registrada de ensaio, expressa em newtons (N);

l é a dimensão do vão entre os 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 média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).

3.7 Imagens de Raios – X

De modo a compreender com melhor precisão a distribuição das fibras metálicas nos corpos de provas ARCDF, duas amostras dos cubos foram segmentadas com a serra mecânica de concreto, em frações de aproximadamente 12 mm. Essas frações foram identificadas nos corpos de prova como P e D, sendo P na seção vertical da moldagem e D, na seção transversal da moldagem, como apresenta a Figura 20 (a e b), respectivamente.

Figura 20 – Segmentação nos cubos com fibras metálicas



(a) Corte na seção vertical da moldagem (b) Corte na seção transversal da moldagem

Fonte: Elaboração própria.

O mesmo processo ocorreu com uma das placas, sendo a mesma segmentada em 5 partes, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Placa segmentada na seção vertical da moldagem e corpo de prova sem sofrer alterações



Fonte: Elaboração própria.

As amostras submetidas as imagens de Raios - X foram as identificadas como P e D, além da segunda fatia da placa segmentada, a qual também não ultrapassou a dimensão de 12 mm, sendo analisada no sentido horizontal da mesma, juntamente com a placa sem alterações, como apresentados na Figura 22 (a e b).

Figura 22 – Processo de Raios - X em corpos de prova com fibras metálicas



(a) Placa inteira e filete na horizontal

(b) Segmentos dos cubos (P e D)

Fonte: Elaboração própria.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais propostos na metodologia para os microconcretos autoadensáveis produzidos. Os ensaios reológicos realizados foram: espalhamento a partir do cone de Abrams, para determinar a fluidez, segregação e exsudação; Funil V, para analisar a viscosidade aparente; e caixa L, para determinar a habilidade passante.

Ademais, são apresentados os resultados obtidos das propriedades mecânicas dos microconcretos autoadensáveis. Foram determinados a resistência à compressão axial em cubos e a resistência à tração na flexão em quatro pontos. Também foi avaliado a distribuição das fibras de aço em uma amostra cúbica e em uma placa através de imagens de raios – X.

4.5 Resultados dos ensaios reológicos

4.5.1 Ensaio de espalhamento com o cone de Abrams

Na tabela 9 são apresentados os resultados do ensaio de espalhamento através do uso do tronco de cone de Abrams. A Figura 20 (a, b e c), mostram o final do espalhamento de cada mistura, sendo: AN, ARCD e ARCDF, respectivamente.

Tabela 9 – Resultados obtidos no ensaio de cone de Abrams

Misturas	Med.1 (mm)	Med.2 (mm)	Média (mm)	<i>t</i> 500 (s)
AN	660	625	643	10
ARCD	540	560	550	48
ARCDF	670	690	680	7

Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 – Imagem ao final do espalhamento – Cone de Abrams



(a) AN

(b) ARCD



(c) ARCDF

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados de espalhamento obtidos, apresentam diâmetros de 643 mm para a mistura AN, e 550 mm para a mistura ARCD. Cabe ressaltar aqui o procedimento realizado para a mistura ARCD descrito no item 3.5.1, o qual possivelmente influenciou no resultado obtido e que foi constatado nos resultados da mistura ARCDF, que possui sua composição semelhante a mistura ARCD com a única diferença a inclusão das fibras. Porém, cabe salientar que existe uma diferença de morfologia das areias utilizadas, conforme imagem do MEV mostrado no item 3.3.1. O agregado RCD é mais poroso e irregular comparado a areia natural e com isso, possivelmente demanda de uma compensação de água durante a mistura com o intuito de equilibrar a absorção de água considerada imediata, e com isso acabou ajudando na diminuição da fluidez do microconcreto.

Para a mistura ARCDF o resultado encontrado foi de 680 mm, sendo o maior espalhamento entre as misturas avaliadas. Esse espalhamento é justificado pela quantidade de superplastificante usado no traço. Todos os traços apresentaram t_{500} maior que 7 segundos o que indica boa estabilidade da mistura em relação a segregação e exudação.

Como dissertado no item 3.6.2, segundo a ABNT NBR 15823 (2017) os resultados do índice de estabilidade visual (IEV), caracterizaram-se como IEV 0 (altamente estável), sem evidência de segregação e exsudação conforme pode ser observado na Figura 23 (a, b e c). Ainda, na Figura 23 (a, b e c) é possível visualizar que há uma distribuição homogênea dos agregados, do centro do diâmetro de espalhamento até as bordas, apresentando boa retenção de água e coesividade. No que tange a mistura ARCDF, a qual possui a inclusão de fibras metálicas, é possível observar uma boa distribuição das fibras, que ocorre de forma uniforme do centro do espalhamento até as bordas.

4.5.2 Ensaio de escoamento no funil

Os dados experimentais obtidos dos ensaios de fluidez no funil V, são apresentados na tabela 10 e uma imagem do ensaio em execução ilustrada na Figura 24.

Tabela 10 – Resultados obtidos dos tempos de fluidez no Funil V

Misturas	Tempo de Escoamento (s)
AN	63
ARCD	122
ARCDF	50

Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Imagem obtida durante a da execução do ensaio no Funil V



Fonte: Elaboração própria.

O tempo de escoamento para a mistura AN foi de 63 s, para a mistura ARCD de 122 s e para a mistura ARCDF de 50 s.

Pode-se notar que a segunda mistura teve um valor elevado de aproximadamente 2 vezes, comparado com a mistura AN. Isso possivelmente está associado ao procedimento de mistura realizado para a mistura ARCD, principalmente pela correção da água e o superplastificante (Item 3.5.1) realizado durante o processo de ajuste da mistura. Ao comparar a mistura de ARCD com ARCDF, a única diferença em sua composição é a inclusão de fibras. Logo, se a mistura ARCD fosse realizada conforme o procedimento de mistura dos microconcretos AN e ARCDF, os resultados seriam muito próximos entre si. Cabe salientar que o procedimento de correção da água em concretos produzidos com agregado proveniente de resíduos de construção e demolição, devido a absorção dos agregados, é uma prática relatada em várias literaturas (GRENZEL 2023; HANSEN, 1992). Observa-se que a absorção do agregado de RCD é de 4,73%, enquanto que o agregado natural é de 0,18%. A diferença de absorção entre os agregados é de aproximadamente 26 vezes, o que para um microconcreto que possui uma relação água/cimento bastante baixa (0,16), como é o caso, vai influenciar sobremaneira no comportamento reológico no estado fresco. Para as

misturas com RCD, foram usados 768 kg/m³ de agregado. Essa quantidade de agregado vai absorver cerca de 36 litros de água da mistura, se considerar uma absorção imediata de 4,73%. Com isso, a mistura passa a ter uma quantidade de água livre de amassamento de 126 litros por metro cúbico. Isso significa que a diminuição de água de amassamento pode chegar a 28%.

Em contrapartida a mistura ARCDF, teve sua viscosidade menor em relação ao traço de referência, o qual mostra que, mesmo com as fibras de aço, não houve interferência na viscosidade, justificada pela correção da quantidade de superplastificante utilizada na mistura.

4.5.3 Resultados dos ensaios da caixa L

Os resultados encontrados após os ensaios utilizando a caixa L (Figura 25) são apresentados na Tabela 11. Todos os ensaios foram realizados com a presença de três barras metálicas como obstáculos para os microconcretos.

Tabela 11 – Resultados encontrados no ensaio da Caixa L

Misturas	H1	H2	Relação H2/H1
AN	6,50	6,00	0,92
ARCD	-	-	-
ARCDF	7,20	7,00	0,97

Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Imagem obtida durante a execução do ensaio da Caixa L



Fonte: Elaboração própria.

A recomendação para os concretos autoadensáveis é que a relação entre H2 e H1, seja maior ou igual a 0,80 quando usado barras de anteparo.

Deste modo, é possível analisar de acordo com a Tabela 11 que esta configuração atendeu os limites para a mistura AN e a mistura ARCDF, estabelecidos para as misturas de concreto, ficando as mesmas acima da relação H2/H1, maior ou igual a 0,80.

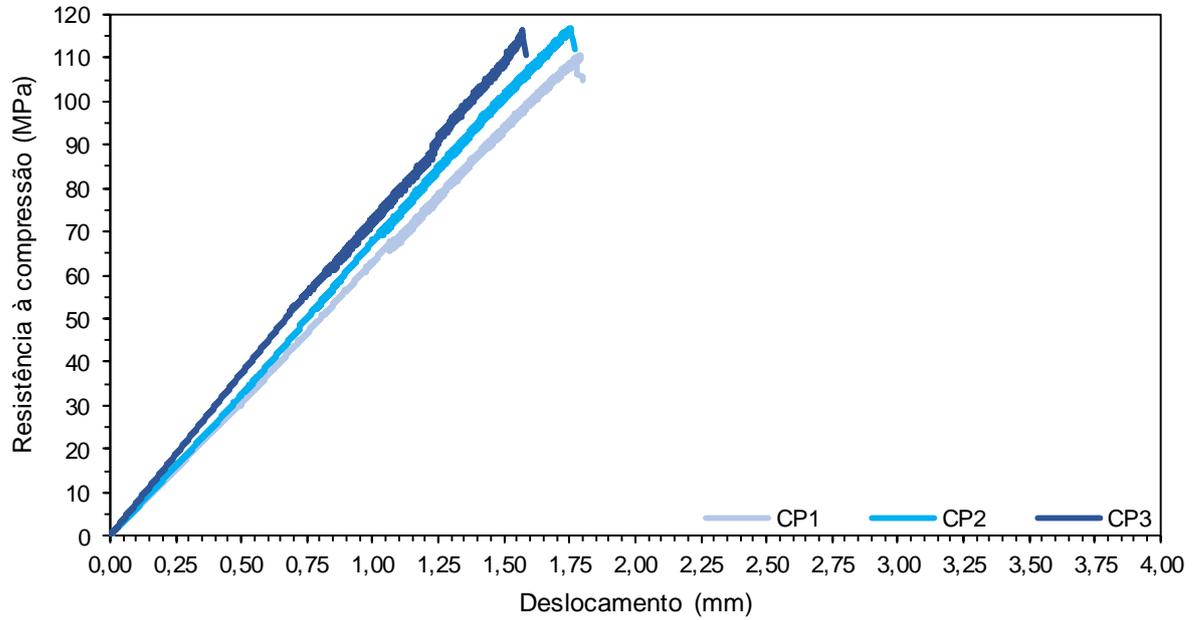
Por outro lado, a mistura com substituição de AN por areia de RCD, não atendeu os limites estabelecidos, pois obteve bloqueamento da mistura nas barras de anteparo. Isso ocorreu pela mistura do traço ter ocorrido de forma distinta dos outros dois traços, já justificados anteriormente.

4.6 Ensaios mecânicos

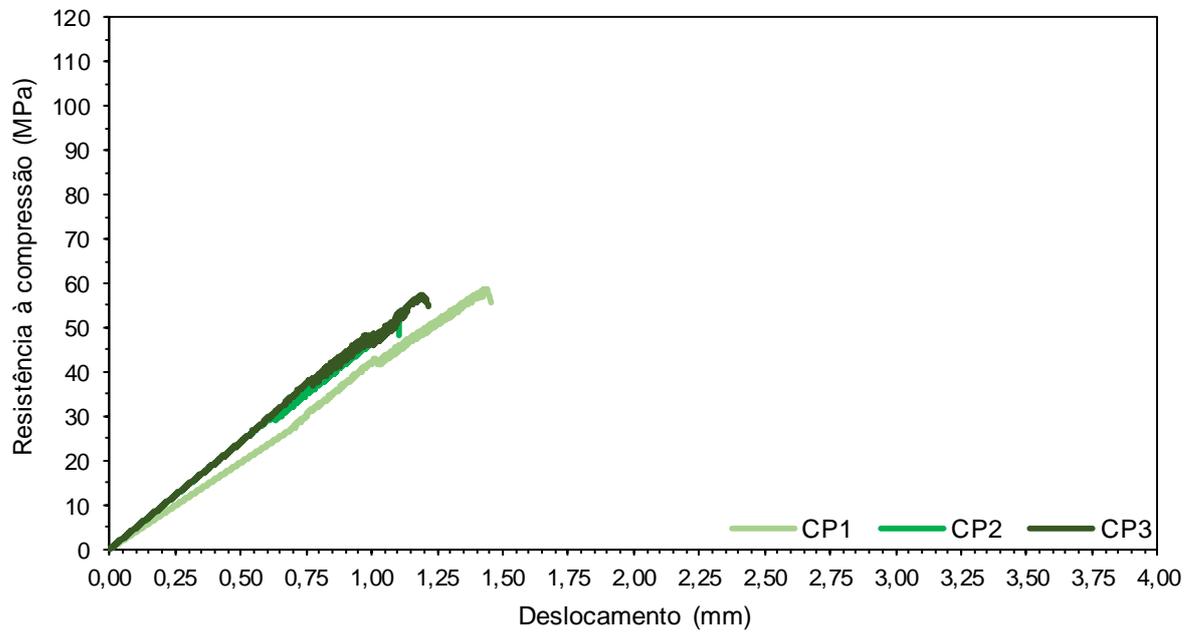
4.6.1 Resistência à compressão axial nos cubos

Os comportamentos dos cubos submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial das misturas AN, ARCD e ARCDF na idade de 28 dias são apresentados na Figura 26 (a, b e c), respectivamente.

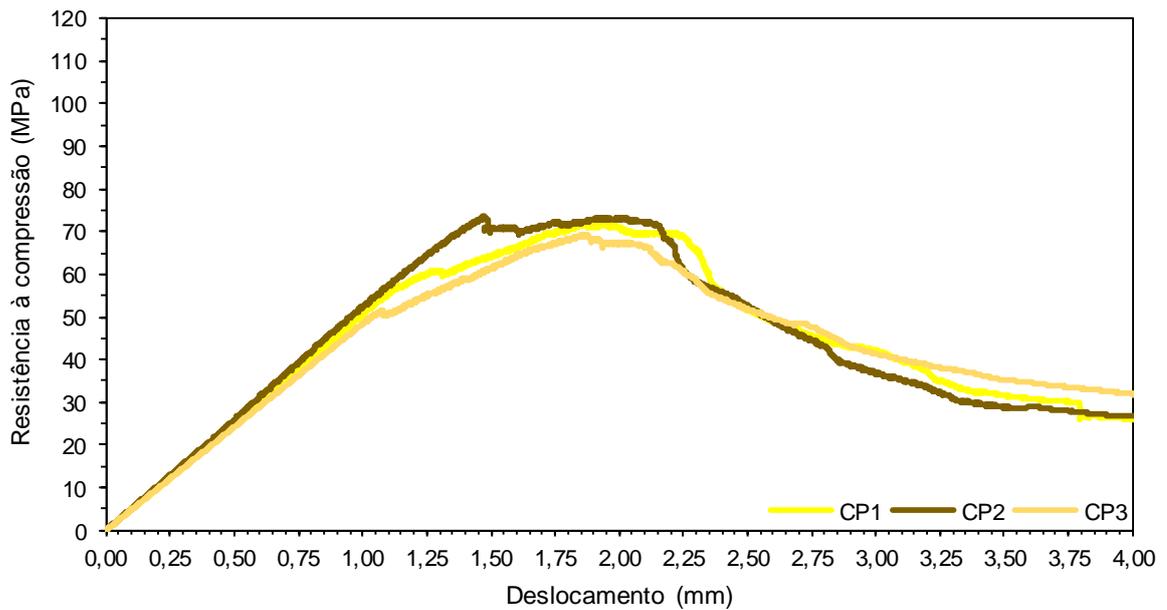
Figura 26 – Comportamentos tensão x deslocamento dos ensaios de compressão axial nos cubos: (a) microconcreto AN, (b) microconcreto ARCD e (c) microconcreto ARCDF



(a) Mistura AN



(b) Mistura ARCD



(c) Mistura ARCDF

Fonte: Elaboração própria.

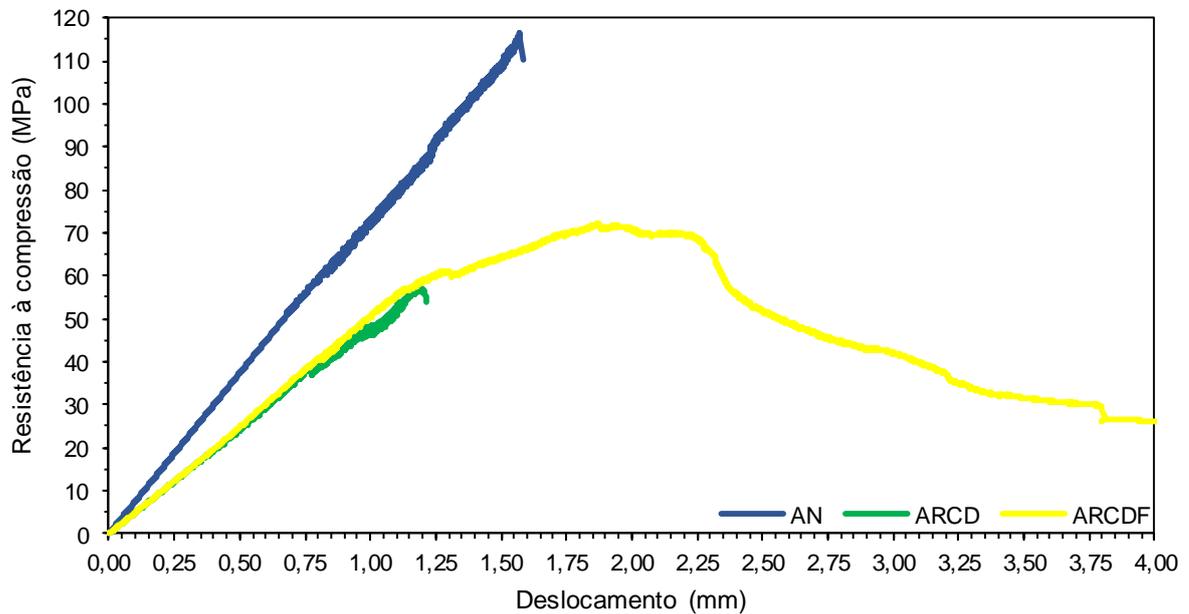
A Tabela 12 apresenta os resultados médios da tensão máxima e deslocamento, além dos desvios padrões e coeficientes de variações dos microconcretos produzidos. A Figura 27 ilustra as curvas típicas das misturas AN, ARCD e ARCDF.

Tabela 12 – Dados dos ensaios de compressão axial

Misturas	Tensão de Compressão (MPa)			Deslocamento (mm)		
	Valor Médio	DP	CV (%)	Valor Médio	DP	CV (%)
AN	114,53	3,47	3,03	1,70	0,11	6,77
ARCD	56,03	3,49	6,22	1,24	0,17	13,88
ARCDF	71,64	2,12	2,96	1,73	0,23	13,35

Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 – Curvas típicas de resistência à compressão X deslocamento das misturas AN, ARCD e ARCDF para comparação



Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado nas Figuras 26 e 27 a substituição total da areia natural de rio por areia de RCD influenciou na rigidez e na perda de resistência dos microconcreto. Várias literaturas apresentam que a utilização de resíduos de construção civil em concreto provoca a perda de rigidez, e conseqüentemente apresentam um menor módulo de elasticidade (HANSEN, 1992; GÓMEZ-SEBERÓN, 2002, 2003; XIAO & FALKNER, 2007). Também é possível observar nas curvas tensão x deslocamento que a ruptura dos microconcretos produzidos sem fibras foi de forma frágil, o que é característico em concretos de alta resistência, acima de 50 MPa.

Ao observar a Tabela 12, a mistura AN obteve uma tensão máxima de 114,53 MPa, enquanto a mistura ARCD teve seu pico de tensão máxima em 56,03 MPa, o que resulta em uma perda de resistência de 51,08% comparado ao microconcreto de referência. Cabe salientar que o procedimento de mistura utilizado para o microconcreto ARCD pode ter influenciado no resultado obtido de resistência à compressão.

A mistura ARCDF, teve sua tensão máxima de compressão de 71,64 MPa, que comparado com a tensão de compressão máxima da mistura AN, foi de 37,45%

menor. No entanto, a mistura ARCDF, comparado com a mistura ARCD, teve um aumento em sua resistência máxima de 21,79%.

No que tange ao deslocamento, é possível observar que o microconcreto AN apresenta um deslocamento médio de aproximadamente 1,70 mm para a tensão máxima. Nesse deslocamento foi possível observar as fissuras visíveis à olho nu, e na sequência a explosão da amostra.

Em relação as misturas com RCD, o deslocamento de primeira fissura visível ocorre em aproximadamente 1,20 mm. O microconcreto nesse deslocamento atinge sua tensão máxima e na sequência perde bruscamente sua resistência à compressão, e então o ensaio foi encerrado.

Por outro lado, o microconcreto ARCDF, no deslocamento de aproximadamente 1,20 mm, é onde se observa a formação da primeira fissura e na sequência há um comportamento de endurecimento do microconcreto. A partir desse momento é onde as fibras entram em ação e são tensionadas, fazendo a ponte de ligação entre as fissuras. Após esse endurecimento forma-se um pequeno platô onde é possível encontrar a tensão máxima de resistência à compressão (deslocamento de aproximadamente 1,73 mm). Nesse platô observa-se uma carga praticamente constante com o aumento do deslocamento. Em aproximadamente 2,25 mm de deslocamento observa-se uma inclinação grande de amolecimento do microconcreto ARCDF, sendo possivelmente que nesse ponto há o descolamento total das fibras, ou seja, elas perdem em sua grande maioria as tensões elásticas totais. Por fim a inclinação de amolecimento diminui, sendo esse o comportamento típico do arrancamento friccional das fibras.

A adição de fibras possibilitou à mistura ARCDF maior tenacidade e ductilidade, tornando o material com uma maior capacidade de absorção de energia sem com que ocorra a ruptura, de forma brusca e explosiva, diferentemente da mistura de referência (AN), ilustrados na Figura 28 (a, b e c).

Figura 28 – Modo de fratura à compressão axial nos cubos



(a) CP AN

(b) CP ARCD

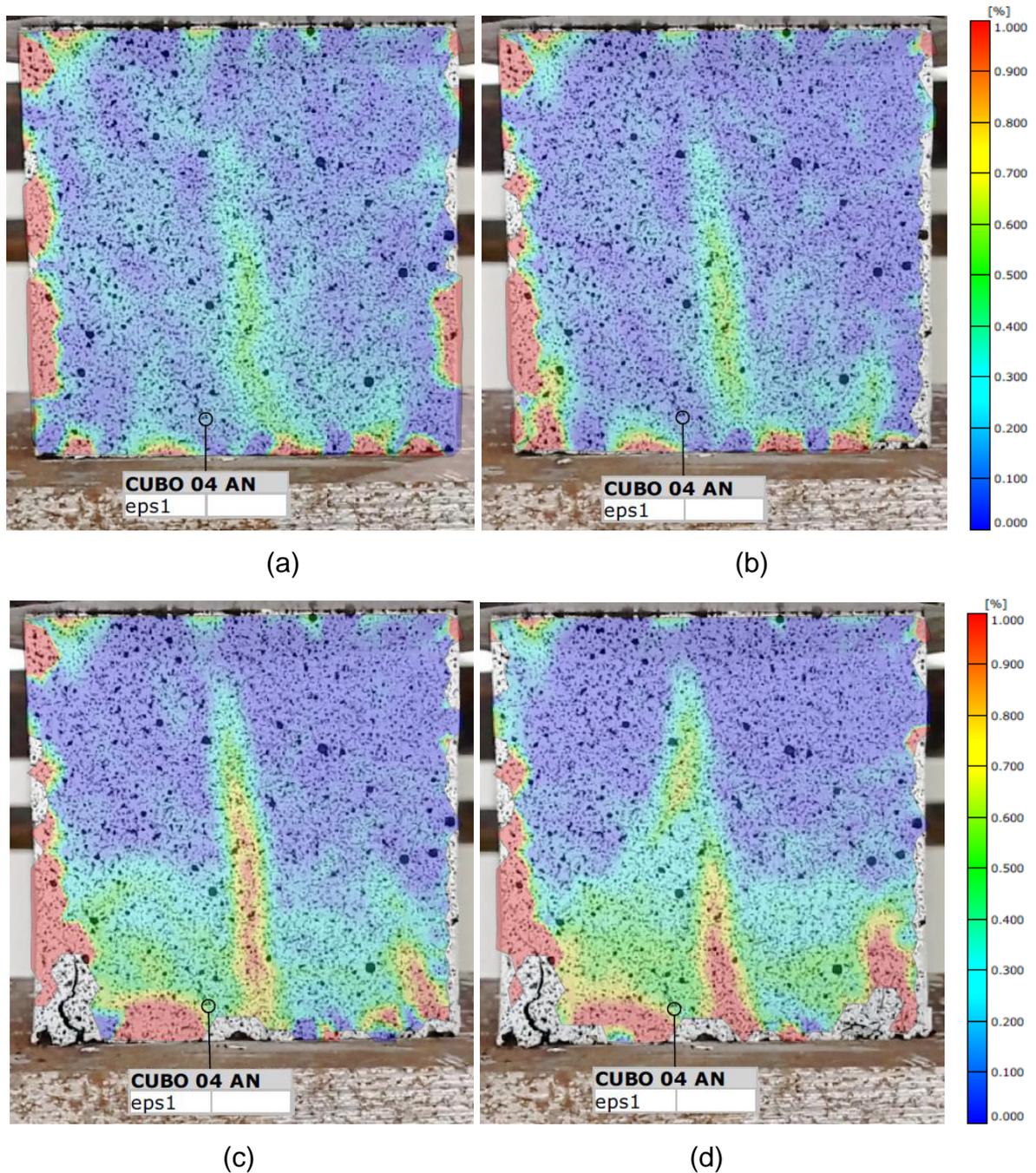


(c) CP ARCDF

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 29 (a, b, c e d) apresentam as imagens obtidas a partir da correlação de imagens digitais analisadas no software GOM Correlate® das amostras identificadas como AN, onde as regiões de cores mais quentes (amarelas e vermelhas), apresentam maior concentração de tensões.

Figura 29 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial mistura AN



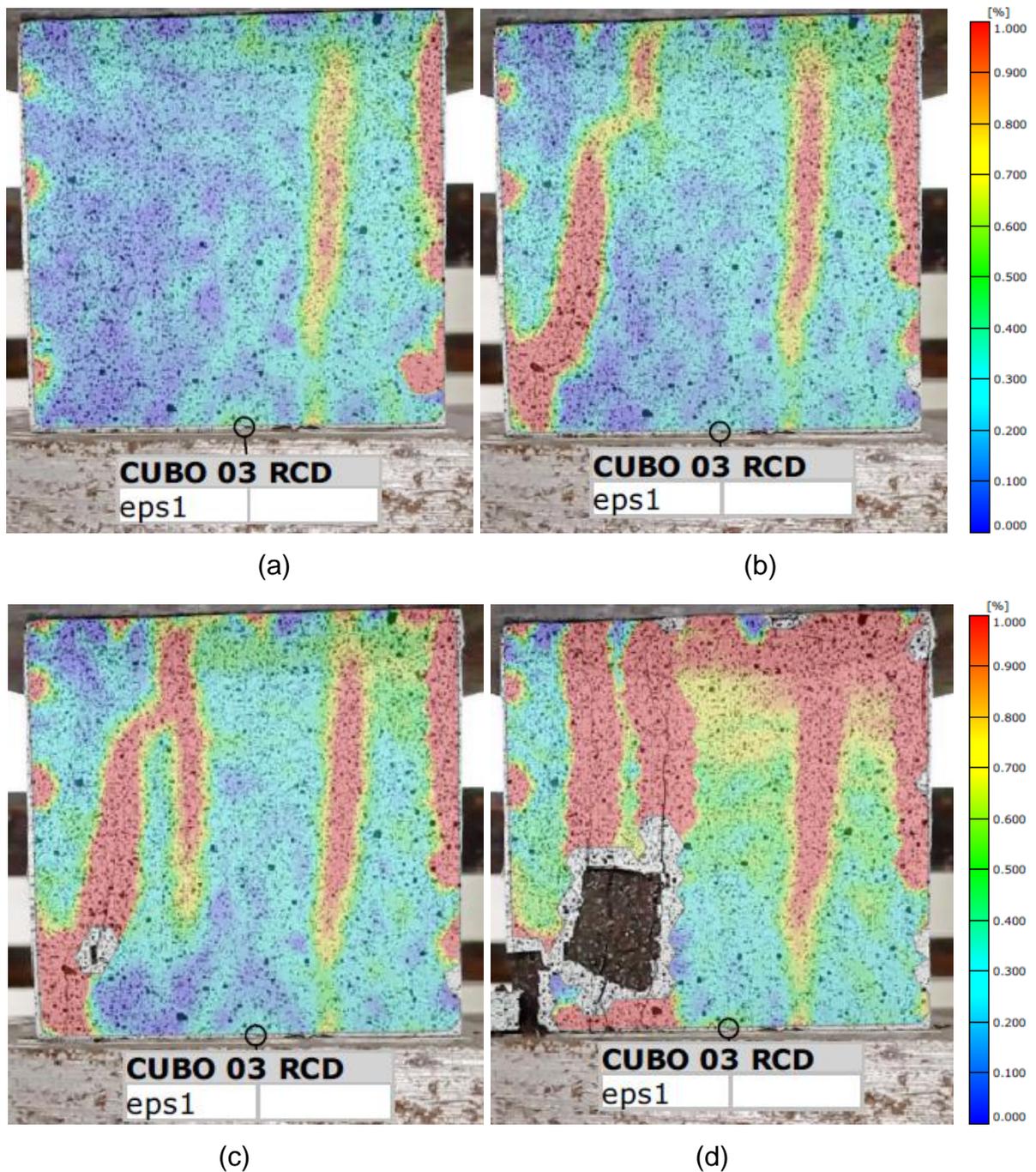
Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar as imagens é possível identificar uma concentração de tensões colunar se formando inicialmente nas extremidades. Também é possível observar na Figura 29 (a), na parte inferior, que se formam 5 pontos concentrados de tensões. Seguindo o ensaio, observa-se um pequeno lascamento no canto inferior esquerdo (Figura 29 c e d) e uma concentração principal, que se torna ponto de ruptura uma

concentração praticamente na metade da amostra. É possível observar que a ruptura ocorre na forma colunar.

Na Figura 30 (a, b, c e d) obtidas da mesma forma que a citada anteriormente, identifica-se o processo de distribuições de tensões da mistura ARCD.

Figura 30 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial da mistura ARCD

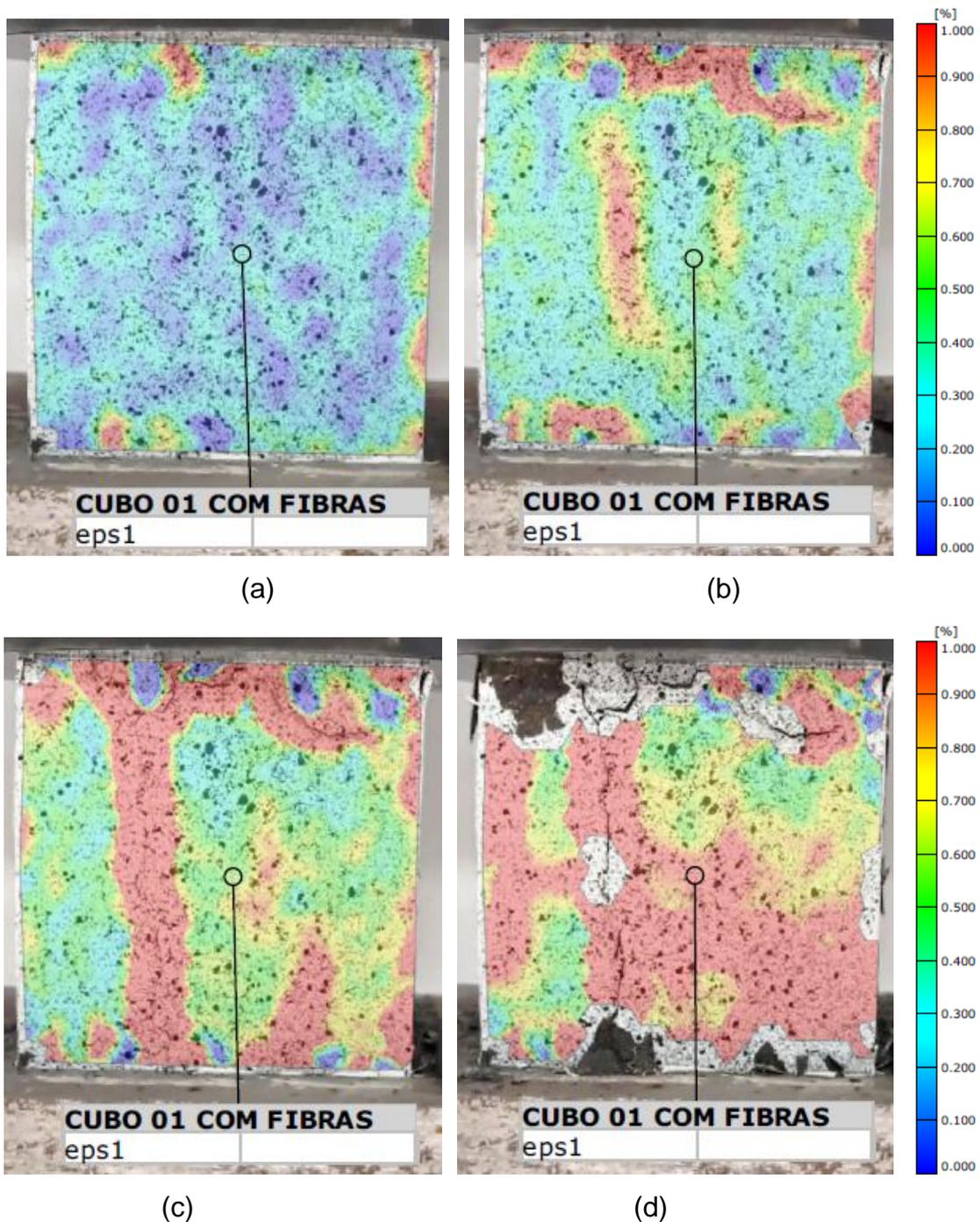


Fonte: Elaboração própria.

Ao observar as imagens da mistura ARCD, é notável uma melhor distribuição de tensões no cubo, com aproximadamente 4 linhas de tensões na forma colunar.

A Figura 31 (a, b c e d) mostra as imagens obtidas através do DIC para o microconcreto ARCDF.

Figura 31 – Processo de ruptura dos cubos submetidos à compressão axial da mistura ARCDF



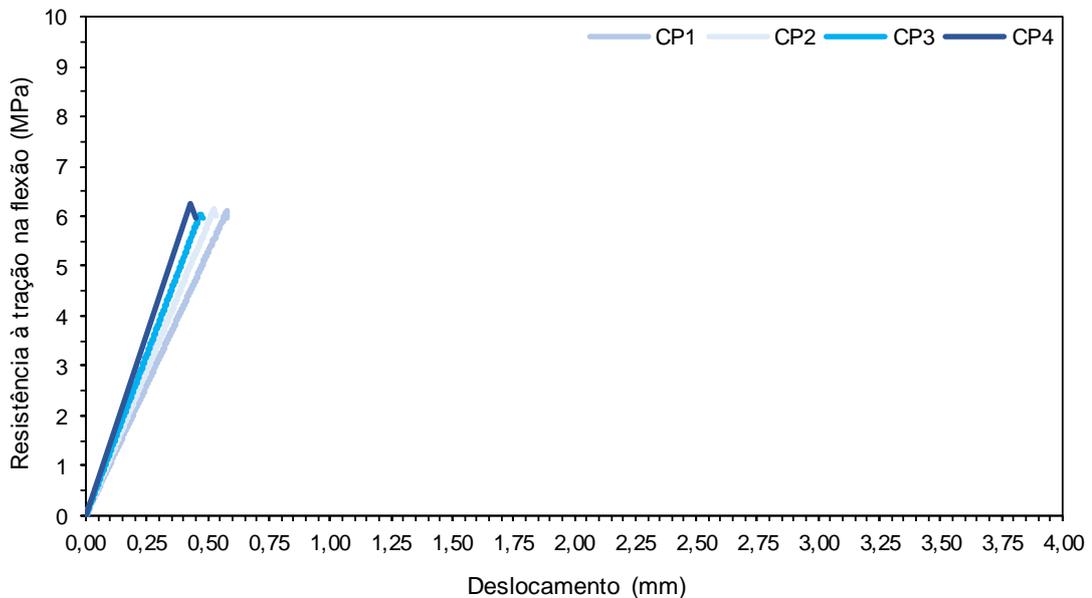
Fonte: Elaboração própria.

Com as correlações de imagens da mistura ARCDF, é notável uma melhor distribuição de tensões no cubo (maiores números de regiões com cores amarelas e vermelhas), sendo dissipadas para todo o corpo de prova, de forma colunar.

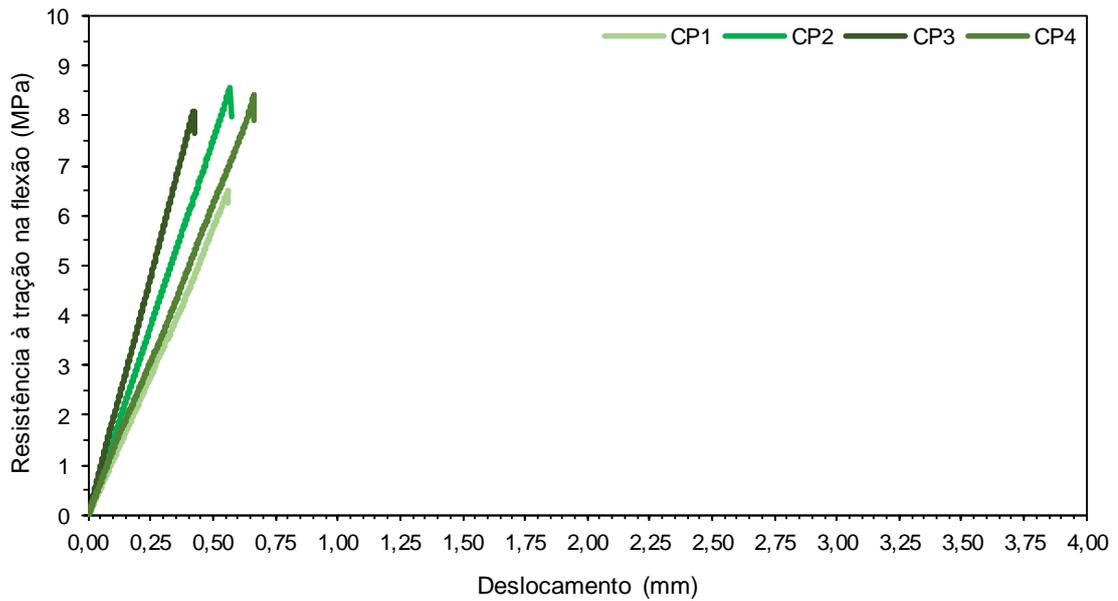
4.6.2 Comportamento à tração na flexão em 4 pontos

Os comportamentos das placas submetidas aos ensaios de resistência à tração na flexão em 4 pontos das misturas AN, ARCD e ARCDF na idade de 28 dias são mostrados na Figura 32 (a, b e c), respectivamente.

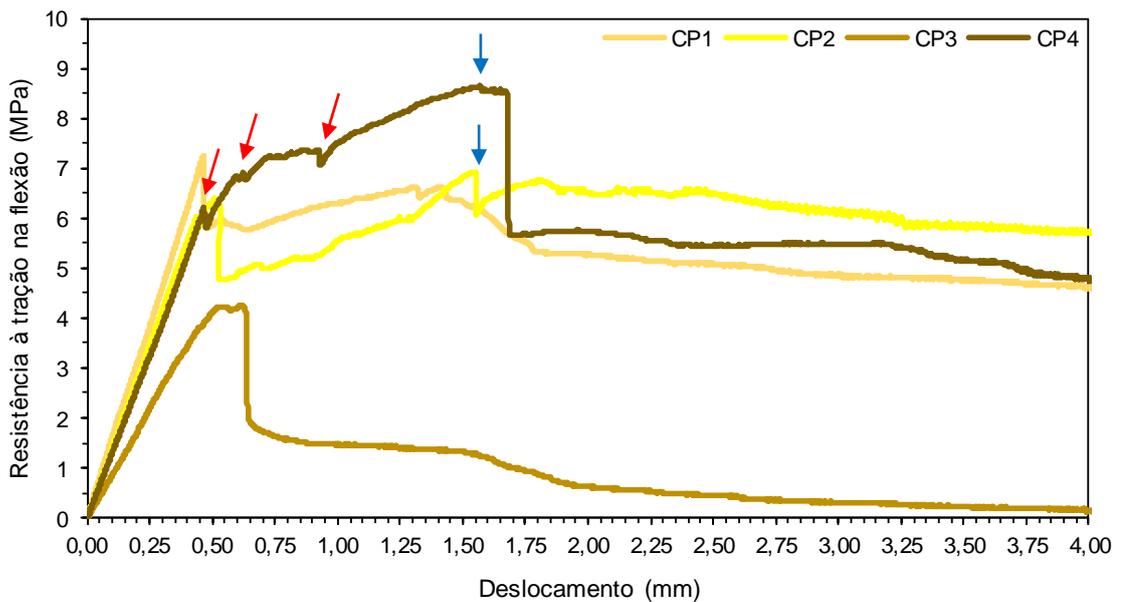
Figura 32 – Comportamentos de tensão x deslocamento da resistência à tração na flexão em 4 pontos dos microconcretos



(a) Mistura AN



(b) Mistura ARCD



(c) Mistura ARCDF

Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 13 são apresentados os dados das médias de tensões máximas e os deslocamentos nesse ponto, desvio padrão e coeficiente de variação de cada uma das misturas de microconcretos.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração na flexão em 4 pontos

Misturas	Tensão na flexão em 4 pontos (MPa)			Deslocamento (mm)		
	Valor Médio	DP	CV (%)	Valor Médio	DP	CV (%)
AN	6,14	0,08	1,37	0,50	0,06	12,62
ARCD	7,90	0,95	12,05	0,55	0,09	18,02
ARCDF	6,77	1,82	26,96	1,04	0,58	56,00

Fonte: Elaboração própria.

A mistura AN obteve uma tensão máxima média de 6,14 MPa, enquanto a mistura ARCD teve seu pico de tensão máxima média de 7,90 MPa. A mistura ARCDF teve sua tensão máxima de tração indireta de 6,77 MPa. Avaliando os dados médios, isso resulta que os dois microconcretos com RCD apresentaram ganhos de resistência à tração da flexão. Ao realizar a análise do teste de Tukey com 95% de probabilidade, os dados obtidos dos microconcretos não apresentaram diferenças significativas de resistência à tração entre elas.

Os deslocamentos referentes a primeira fissura de todos os microconcretos avaliados foram de aproximadamente 0,50 mm. Por outro lado, as amostras CP2 e CP4 do microconcreto ARCDF, apresentaram deslocamentos de aproximadamente 1,55 mm para o ponto onde ocorre a tensão de tração à flexão máxima (ver setas azuis na Figura 32 (c)). Essas variações observadas nas amostras contendo fibras, serão detalhadas mais a frente, após a apresentação do modo de fratura, da correlação das imagens e das imagens de raios – x.

A Figura 33 (a e b) mostra o processo de execução do ensaio da flexão em 4 pontos e o modo de ruptura do microconcreto AN, respectivamente.

Figura 33 – Processo de ensaio de tensão na flexão em 4 pontos e ruptura na placa da mistura AN



(a)

(b)

Fonte: Elaboração própria.

Como apresentado na Figura 33 (b), o modo de ruptura nas placas da mistura AN ocorrem de forma abrupta, o que caracteriza uma ruptura frágil. O mesmo aconteceu nas placas da mistura ARCD, a qual é mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Modo de ruptura na placa ARCD



Fonte: Elaboração própria.

Diferentemente das misturas AN e ARCD a mistura ARCDF, mostrada na Figura 35 (a e b), a ruptura das placas se deram de maneira dúctil, o que possibilitou uma intensa deformação plástica. Na Figura 35 é mostrada os modos de fratura de duas amostras; uma onde é possível observar uma única fissura (a) e a outra contendo duas fissuras (b). Essa observação vai ser utilizada mais a frente, após a

apresentação do modo de ruptura obtidos através da correlação de imagens e das imagens de raios – x.

Figura 35 – Modo de ruptura nas placas ARCDF



(a) CP3

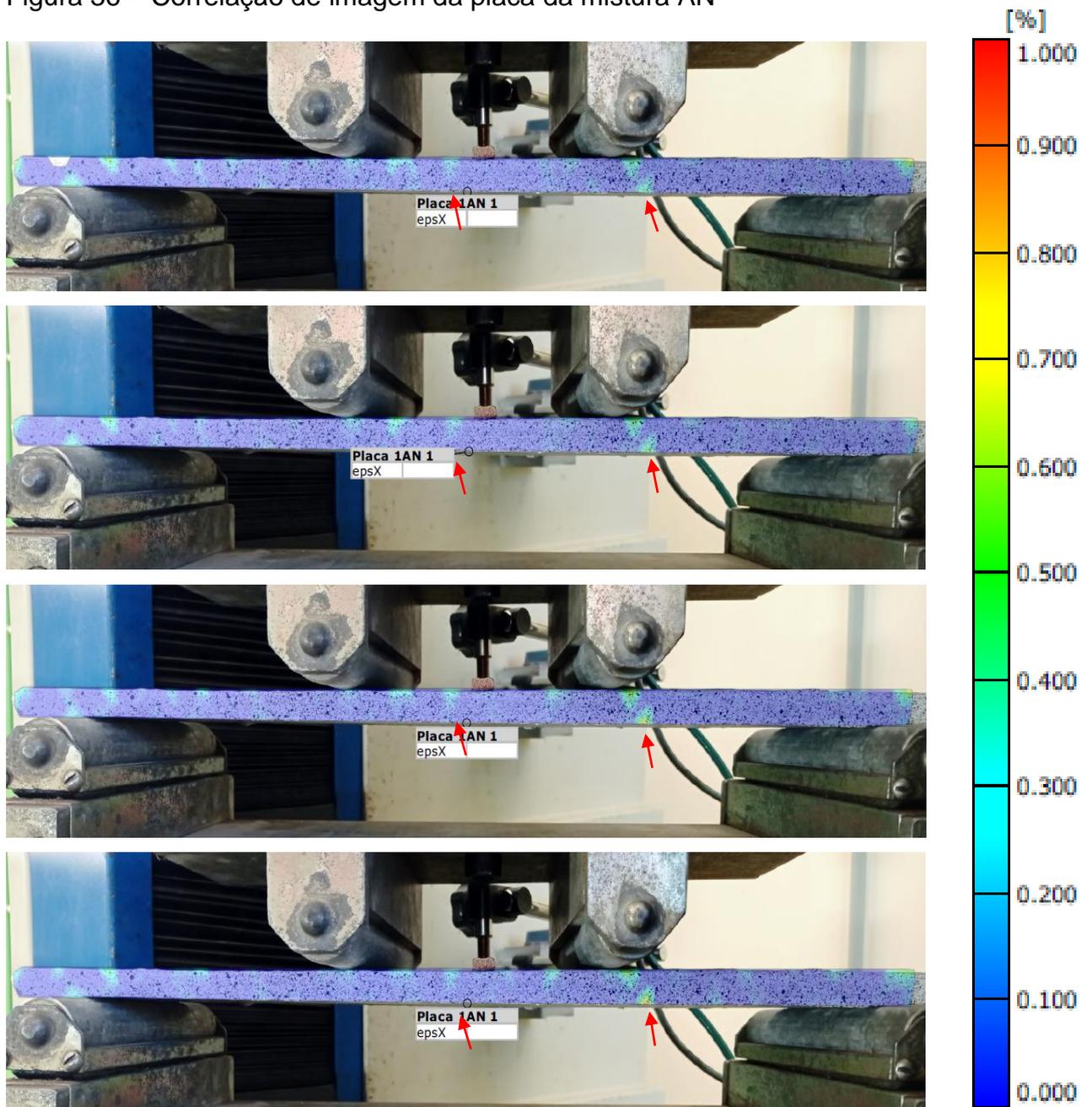


(b) CP4

Fonte: Elaboração própria.

As placas foram submetidas a correlação de imagens analisadas no software GOM Correlate® das amostras identificadas como AN, ARCD e ARCDF. A Figura 36 ilustra as concentrações de tensões obtidas na placa da mistura AN.

Figura 36 – Correlação de imagem da placa da mistura AN

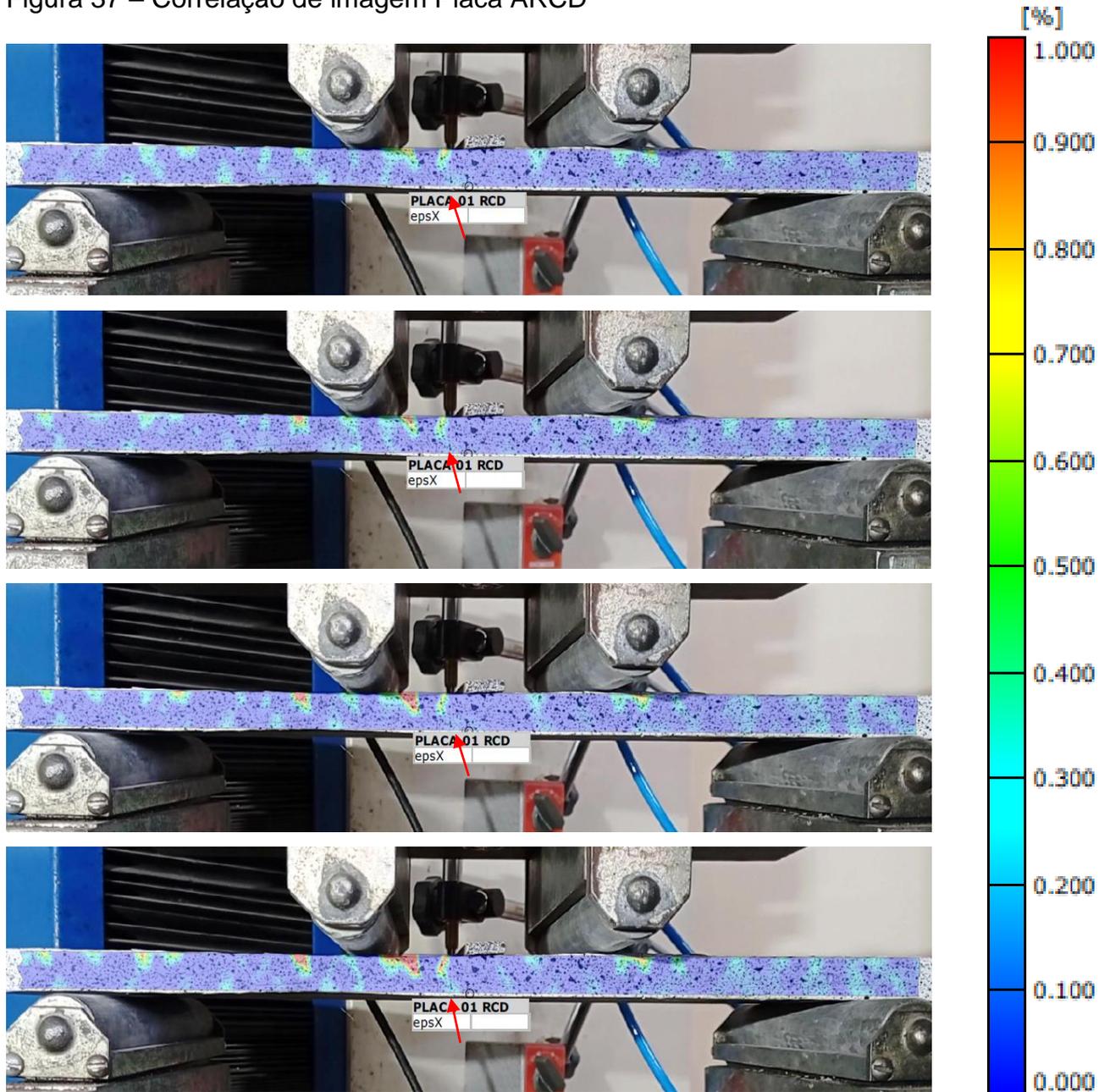


Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar as imagens é possível observar uma maior concentração de tensão ao terço central da placa, se intensificando com o decorrer do ensaio. A ruptura da amostra ocorre na parte central, apesar da maior concentração de tensão aparentemente estar abaixo do apoio da direita. Isso possivelmente ocorreu por haver uma zona frágil na seção daquele ponto.

O mesmo processo ocorre com a mistura ARCD, apresentando uma concentração de tensão muito similar a mistura AN (Figura 37). A ruptura ocorre de forma abrupta, no terço central da placa.

Figura 37 – Correlação de imagem Placa ARCD

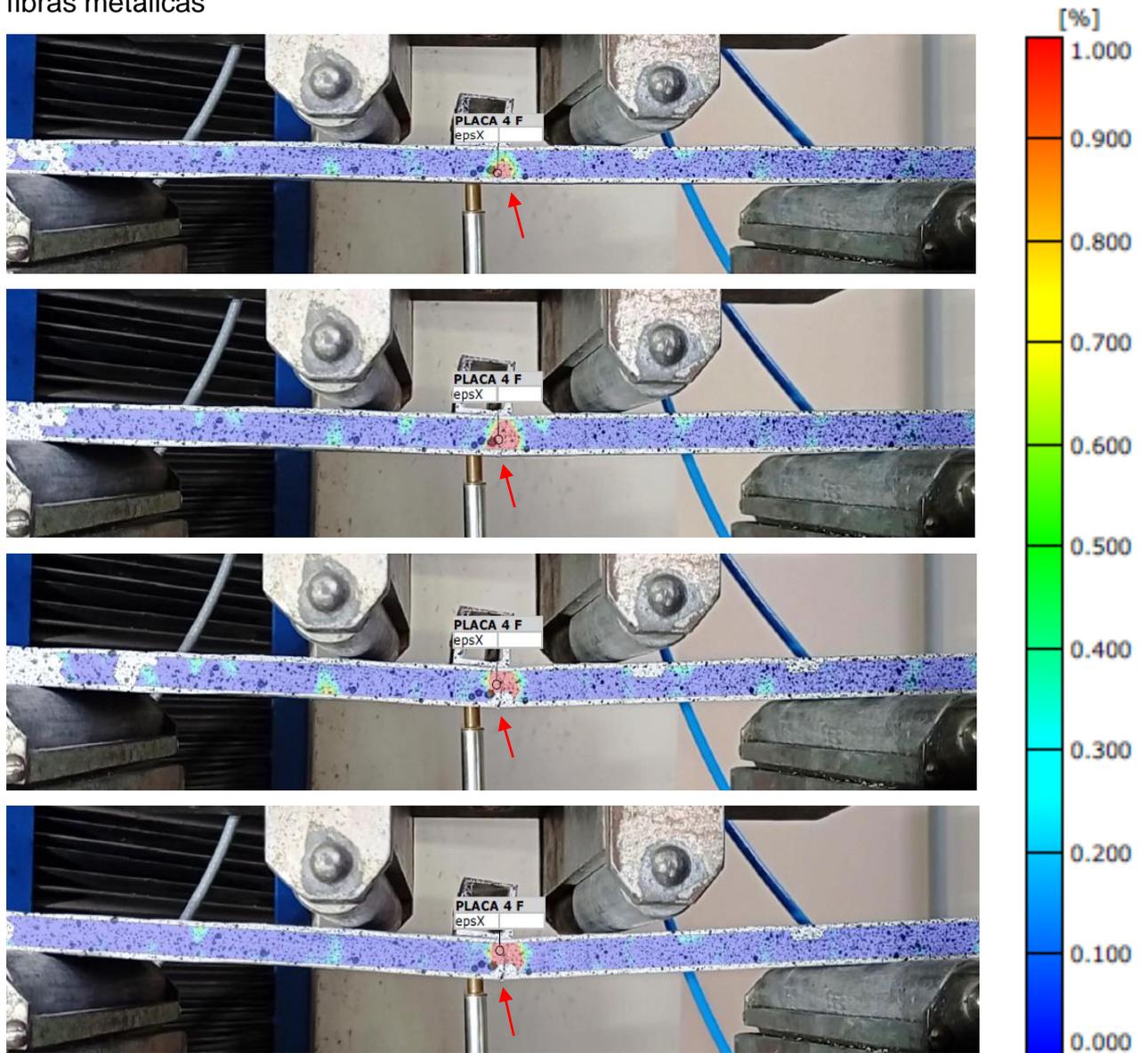


Fonte: Elaboração própria.

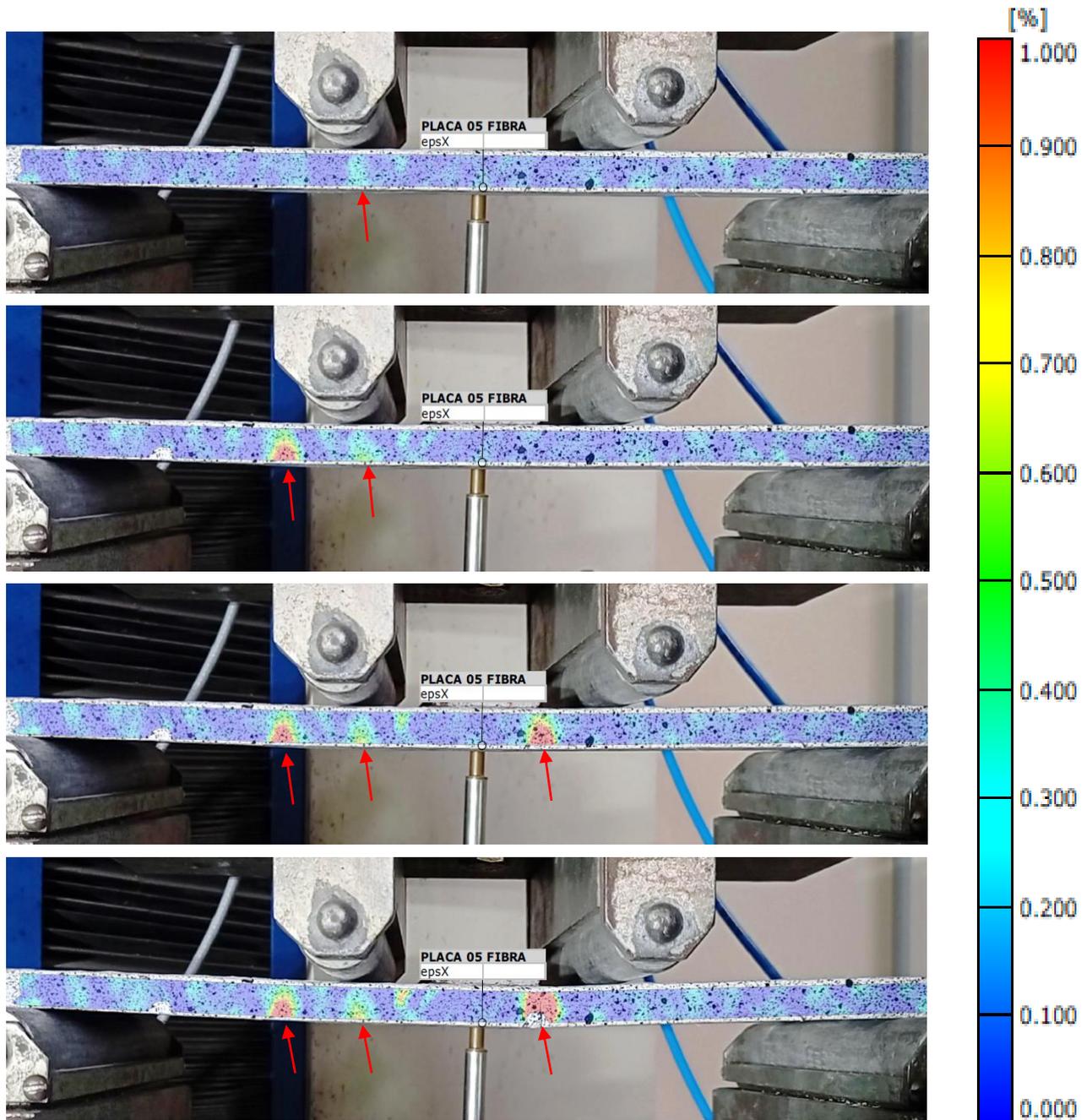
No entanto, ao analisar as imagens mostradas na Figura 38 (a e b) e voltar na Figura 32 (c), obtidas para o microconcreto ARCDF, é possível identificar um comportamento diferente das demais misturas que não contém fibras. A ruptura ocorre de forma dúctil e lenta, pois as fibras fornecem ao microconcreto no estado

endurecido maior tenacidade e ductilidade. O maior acúmulo de tensões ocorre onde as fibras metálicas se encontram com menor volume e orientação contrária a ação das tensões normais principais. Uma análise mais aprofundada será realizada no capítulo a seguir, uma vez que todas as informações se complementam.

Figura 38 – Correlação das imagens do microconcreto contendo areia de RCD e fibras metálicas



(a) CP03



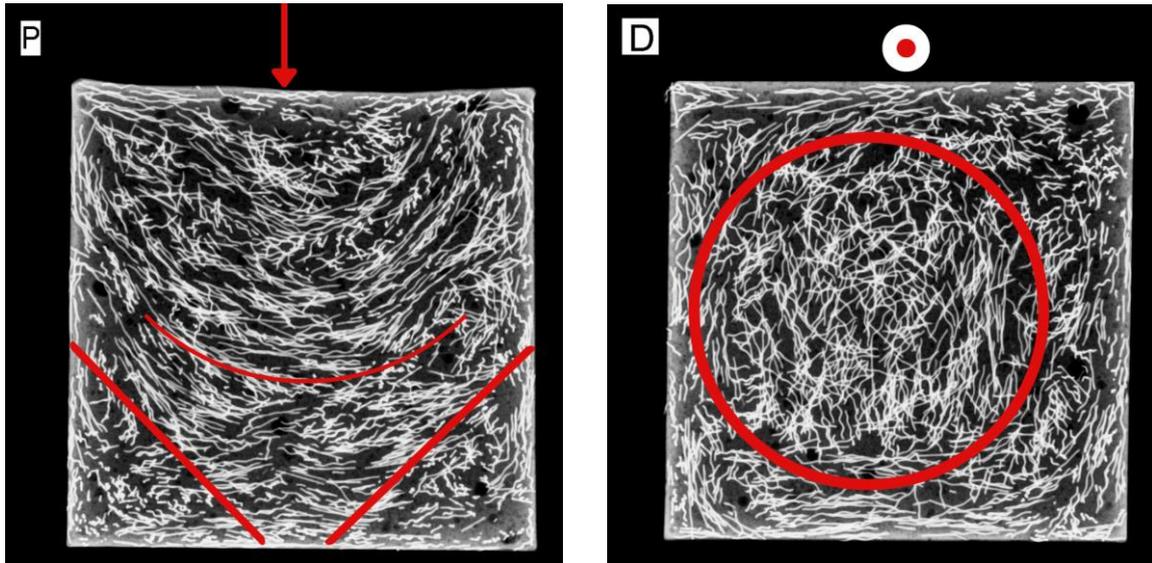
(b) CP04

Fonte: Elaboração própria.

4.7 Resultado obtido através de Imagens de Raios – X

Na Figura 39 (a e b) são apresentadas as imagens de raios - x dos cubos segmentados, identificados como P e D, respectivamente.

Figura 39 - Imagens de raios - x dos corpos de prova cúbicos com fibras metálicas



(a) Corte na seção vertical em relação a moldagem

(b) Corte na seção transversal em relação a moldagem

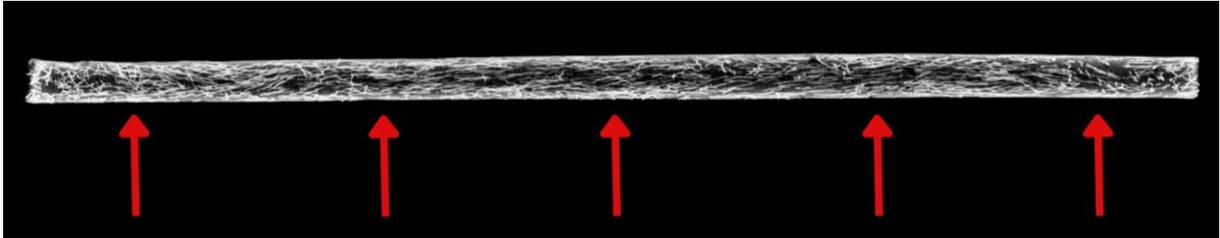
Fonte: Elaboração própria.

Com as imagens é possível analisar a distribuição das fibras em duas seções dos corpos de prova. Na Figura 39 (a), o sentido da moldagem é indicado pela flecha vermelha. As fibras encontram-se com maior disposição central e predominantemente alinhadas em forma côncava, enquanto na extremidade inferior sua disposição é aleatória. O ponto vermelho indicado na Figura 39 (b), representa a direção de lançamento do microconcreto da amostra. É possível observar uma concentração maior de fibras no centro do círculo vermelho, sendo essa de forma aleatória e uma boa disposição paralela ao plano da imagem. Na parte externa ao círculo, é possível observar que existe uma perturbação da distribuição, com predominância das mesmas estarem paralelas as laterais da amostra, ou seja, uma perturbação possivelmente acarretada pelo “efeito parede”.

Na Figura 40 é mostrada a imagem de raios – x realizado em uma tira da placa retirada em relação ao seu comprimento e contendo cerca de 12 mm de largura por 12 mm de espessura. É possível observar uma maior concentração das fibras de aço na parte superior e inferior da amostra. Isso deve-se ao “efeito parede”. Tal comportamento está associado à espessura da placa, de aproximadamente 12 mm, sendo essa o comprimento da fibra utilizada. Deste modo, o efeito parede influencia de maneira positiva nas distribuições das fibras, tornando o alinhamento

predominantemente em duas direções e reduzido na terceira, sendo essa última a altura.

Figura 40 – Imagem de raios – x da fração 2 da placa ARCDF



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 41, é mostrada a imagem de raios – x da placa visualizando a mesma pela parte superior, ou seja, na mesma direção do lançamento do microconcreto. É possível visualizar que do lado direito da placa há uma maior concentração das fibras, seguido de uma distribuição bem aleatória e homogênea. Do lado esquerdo da placa, é possível observar que há uma menor concentração das fibras, e aparentemente mais manchas escuras são percebidas, sendo essas manchas ausência de fibras, embora sua distribuição também se encontre de forma aleatória.

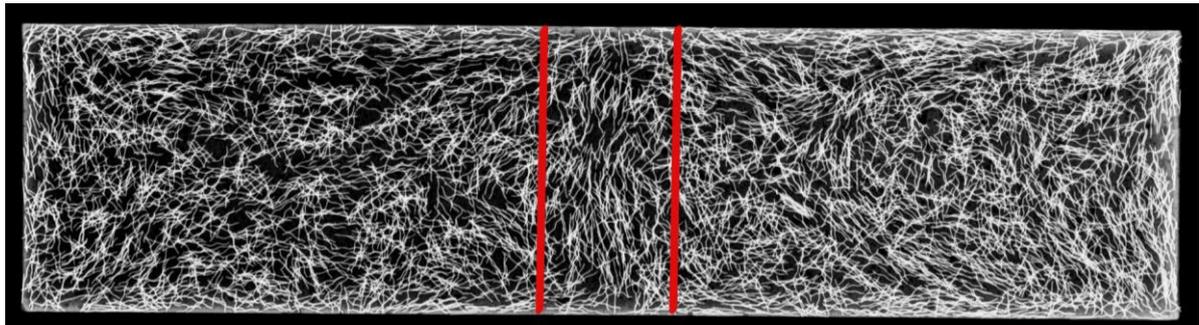
No centro (entre as duas linhas vermelhas), há uma menor concentração de fibras, assim como uma distribuição perpendicular ao comprimento da amostra. Essa placa, foi ensaiada a flexão em 4 pontos, onde as tensões máximas e principais são concentradas no terço central da amostra. Com a observação realizada na imagem de raios – x é possível prever que a ruptura da amostra vai ocorrer entre as duas linhas vermelhas. Conforme Figura 32 (c), o CP3 foi a amostra que apresentou menor resistência mecânica entre as quatro placas ensaiadas e a Figura 35 (a) e Figura 39 (a) comprovam a formação de uma única fissura, localizada exatamente entre as linhas vermelhas mostradas na imagem de raios – x na Figura 41.

Por outro lado, é importante destacar o comportamento de tensão de tração na flexão x deslocamento e da imagem da correlação de imagens da placa denominada CP4 (ver Figura 32 (c), Figura 35 (b) e Figura 38 (b)). Nesse caso, é possível deduzir que as fibras no terço central da amostra devem estar alinhadas preferencialmente na direção longitudinal da placa. Isso é possível concluir uma vez que para essa amostra o comportamento à flexão foi de endurecimento após o

aparecimento da primeira fissura, e na sequência outras duas quedas são visualizadas no gráfico de tensão de tração na flexão x deslocamento (ver setas vermelhas na Figura 32 (c)), as quais possivelmente são formadas outras duas fissuras. Com a Figura 35 (b) e Figura 38 (b) é possível concluir tal suposição, pois na primeira é possível observar que a amostra CP4 formou duas fissuras visíveis e a segunda mostra três pontos de concentração de tensões (ver setas vermelhas Figura 39 (b)).

Por fim, com as análises apresentadas anteriormente, pode -se justificar a grande variação do comportamento tensão de tração na flexão x deslocamento mostradas na Figura 32 (c). O processo de moldagem desse tipo de material influencia sobremaneira em seu comportamento mecânico. A imagem de raios - x da amostra CP4 será realizada quando houver a disponibilidade do equipamento de raios - x para confirmar as afirmações.

Figura 41 – Imagem de Raios - X vista vertical da placa ARCDF



Fonte: Elaboração própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, são apresentados a seguir as conclusões referentes aos ensaios reológicos no estado fresco (cone de Abrams, funil V e caixa L), resistência à compressão axial nos cubos e resistência à tração na flexão em quatro pontos nas placas. O processo de fissuração dos corpos de prova foi analisado através do software GOM Correlate[®] e as distribuições das fibras foram estudadas a partir de imagens de raios -x.

No que se refere aos ensaios reológicos no estado fresco, todas as misturas apresentaram propriedades necessárias para classificá-las como microconcreto autoadensável. Ao realizar o ensaio do tronco de cone de Abrams é possível afirmar que todas as misturas alcançaram a fluidez necessária mínima de 550 mm, além de não haver segregação nem exudação das misturas. O microconcreto de referência (AN) e a mistura ARCDF, apresentaram uma melhor viscosidade em relação a mistura ARCD, fato este devido ao procedimento da mistura ARCD realizados para essa mistura, além da morfologia dos agregados de RCD, os quais são rugosos. O mesmo ocorre no ensaio que determina a habilidade passante (caixa L), sendo as misturas AN e ARCDF obteram uma relação de H2/H1 maior que 0,80, enquanto a mistura ARCD obteve bloqueamento, não atendendo os limites estabelecidos.

Os resultados para a resistência à compressão axial das misturas com RCD apresentaram valores menores que a mistura de referência AN. Os valores dos microconcretos com areia de RCD foram de 51,08% e 37,45% em relação ao microconcreto AN, para as misturas ARCD e ARCDF, respectivamente. Por outro lado, a mistura ARCDF em relação ao ARCD apresentou um aumento de 21,79%, o que confirma que inclusão de fibras metálicas proporcionou aumento da resistência à compressão, bem como, proporcionou ao microconcreto tenacidade e ductilidade, fazendo com que o modo de ruptura seja dúctil.

Os resultados de resistência à tração na flexão em quatro pontos para as misturas com utilização de RCD (ARCD e ARCDF), apesar de apresentarem na comparação direta aumento médio de 28,66% e 10,26% em relação a mistura AN, ao realizar o teste de Tukey com 95% de probabilidade, as misturas não apresentaram diferenças significativas entre si.

As correlações de imagens digitais obtidas através do software GOM Correlate[®] para as misturas AN e ARCD dispuseram de comportamentos

semelhantes. Foi observado uma concentração de tensões colunares (quando se tratando dos cubos submetidos a ensaios de compressão) e uma concentração de tensão de tração nos ensaios de flexão no terço central (quando se tratando das placas ensaiadas a flexão em quatro pontos). Ao associar os resultados encontrados no DIC e imagem de raios – x para a mistura de ARCDF, é possível identificar uma concentração de tensões nos locais de menor concentração de fibras, bem como do alinhamento desproporcional ou contrarias as tensões principais. Ainda, foi possível identificar que o processo de moldagem influenciou sobremaneira na distribuição das fibras, sendo que os ensaios apresentaram grande variabilidade.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise do desempenho reológico e mecânico do microconcreto autoadensável com o uso de RCD, e com o uso de RCD e reforçado com fibras metálicas é complexo e outros trabalhos devem ser realizados com o intuito de aprofundar, acrescentar e potencializar os resultados aqui discutidos. Deste modo, sugestões para a continuação do estudo são apresentados a seguir:

- Estudar a possibilidade de correção da reologia no estado fresco dos microconcretos produzidos com RCD, sem adicionar a água de absorção dos agregados, e corrigir somente com a adição de aditivo químico superplastificante.
- Realizar as imagens de Raios-X em todas as placas com inserção de fibras metálicas, posteriormente realizar os ensaios e avaliar o comportamento mecânico das mesmas;
- Realizar o lançamento do microconcreto nos corpos de prova, identificados como placas, em diferentes posições nos moldes, como exemplo, lançar o microconcreto no centro e deixar escoar para os lados, a fim de analisar as distribuições das fibras;
- Hibridizar as fibras, ou seja, utilizar diâmetros e comprimentos diferentes para comparar os resultados;
- Utilizar outras frações de substituição de areia natural por areia de RCD, e avaliar as alterações dos ensaios reológicos e mecânicos;
- Verificar a influência da cura térmica após os 28 dias de cura úmida, a fim de induzir a hidratação dos produtos do cimento Portland;

REFERÊNCIAS

- ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável – Parte 1 a 6. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto auto-adensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto auto-adensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – ABRECON. **70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente**. Disponível em: <<http://www.abrecon.org.br/o-que-e-entulho/>> Acesso em: 22 de set. de 2023.
- BACARJI, E.; CAMPOS NETO, T. F.; PEREZ, E. W. R.; LIMA, M. A.; MATINS, M. V. Efeitos da adição de diferentes teores de pó de granito nas propriedades mecânicas do microconcreto. **In: Congresso Brasileiro do Concreto**. Belo Horizonte, 2016.
- Branco, R. P. **Utilização de resíduos de concreto em concreto auto-adensável**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma introdução. 5ª ed., **Editora Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. – LTC**, Rio de Janeiro, 2002.

CARNEIRO, A. P. et al. Caracterização do entulho de Salvador visando à produção de agregado reciclado. **In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído**. 7. Anais... Salvador: ANTAC, 2000.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307**. Brasília, 2002.

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, C. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. **In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice**. São Paulo, 2000. Proceedings. São Paulo, EPUSP, 2000.

Gomes, P. C. C.; Barros, A. R. Métodos de dosagem de concreto auto-adensável. São Paulo: **Pini**, 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and Concrete Research**. vol. 32, p. 1301-1311, 2002.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Relationship between gas absorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**. vol. 25, nº. 2, p. 42-48, 2003.

GRENZEL, L. Y. S. **Avaliação das propriedades físicas, mecânicas e residuais de concretos celulares produzidos com areia natural e de RCD**. 2023. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2023.

HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete: third state-of-the-art report 1945-1989. **In: Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Technical Committee Report N. 6**, London, p. 1-163, 1992.

HENDRICKS, C. F. Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings. **In: Environmental aspects of construction with waste materials**. Amsterdam: Elsevier, p. 821-834, 1994.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2022. **Censo demográfico 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal> Acesso em: 05 de nov. de 2023.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JUCÁ, P. H. de O. **Avaliação do mecanismo de transferência de tensões e formação de fissuras no concreto autoadensável com reforço híbrido**. 2020.

124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. World Bank Publications, 2018.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**. vol. 35, p. 763-769, 2005.

LAMEIRAS, R. M. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro (Glass Fibre Reinforced Cement – GRC)**. 2007. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2007.

LEITE, M. A. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2001.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006. 322 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

MARTINEAU, P; AGOPYAN, V. Conferencia Magna I – Compósitos: material inovador. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

MATSUMOTO, T. & LI, V.C. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation. **Cement & Concrete Composites**, v.20, out 1998.

MATSUMOTO, T. & LI, V.C. Fatigue life analysis of fiber reinforced concrete with a fracture mechanics based model. **Cement & Concrete Composites**, v.21, ago 1999.
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. Ed. IBRACON, 674 p., São Paulo, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos.html#content>> Acesso em: 11 de out. de 2023.

NUNES, A. S. **Desenvolvimento de cerâmicas refratárias com substituição da argila refratária por sílica da casca de arroz, microfibras cerâmicas e fibras de aço: caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas**. 2017. 116

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced concrete technology**. v. 1, n.º. 1, p. 05-15, 2003.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. **Construction And Building Materials**. v. 163, p. 557-570, 2018.

RAVINDRARAJAH, S. R.; STEWART, M.; GRECO, D. Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties: a case of study in Australia. **In: International Workshop on Recycled Aggregate**. Proceedings. Niigata, Japan, 2000.

RAVINDRARAJAH, S. R.; TAM, C. T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**. v. 37, n.º. 130, 1985.

SANTIAGO, M.O. Aplicações do GRC-cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. **In.: Arqimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**. v. 65, p. 201-217, 2014.

SILVA, W. G. **Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

TENESI, J.; AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. **II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil**. EPSP. São Paulo, 1997.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto auto-adensável. São Paulo: **Pini**, 2008.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**. v. 63, ed. 2, p. 339-346, 2010.

XIAO, J.; SUN, Y.; FALKNER, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. **Engineering Structures**. v. 28, p. 1-8, 2006.

ZWAN, J. T. Application of waste materials – a success now, a success in the future.
In: Waste materials in constructions: putting theory into practice. Proceedings.
Great Britain, 1997.